

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra automatizační techniky a řízení

Vybrané přístupy experimentální identifikace

Chosen Approaches to Experimental Identification

Student: Martin Bečka

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Bečka**
Studijní program: **B2341 Strojírenství**
Studijní obor: **3902R001 Aplikovaná informatika a řízení**
Téma: **Vybrané přístupy experimentální identifikace**
Chosen Approaches to Experimental Identification
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s vybranými metodami experimentální identifikace přechodových charakteristik.
2. Demonstrujte postup identifikace jednotlivými metodami na testovacích datech a porovnejte jejich přesnost.
3. Proveďte identifikaci vybraného laboratorního modelu a verifikujte správnost návrhu.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhnete směry dalšího řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:

NOSKIEVIČ, Petr. Modelování a identifikace systémů. Ostrava: Montanex, 1999, iv, ii, 276 s. ISBN 80-7225-030-2.

BOLTON, W. Instrumentation and Control Systems. Oxford: Newnes, c2004, xi, 339 s. ISBN 0-7506-6432-0.

SLOVÁK, T. Využití simulačního programu SIPRO pro identifikaci a prezentaci výsledků v prostředí Internetu. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 2002. 96 stran. Bakalářská práce, vedoucí: Wagnerová, R.

ISERMANN, Rolf, MÜNCHHOF, Marco. Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications. Berlin: Springer, c2011, xxv, 705 s. ISBN 978-3-540-78878-2.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16. 5. 2016


..... 

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 16.5.2016


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Martin Bečka

Adresa trvalého pobytu autora práce:

L. Zápotockého 152

Bzenec 696 81

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Bečka, M. *Vybrané metody experimentální identifikace*. Ostrava: katedra ATR-352 VŠB-TUO, 2016. 69 s. Bakalářská práce, vedoucí: Wagnerová, R.

Bakalářská práce se zabývá vybranými metodami experimentální identifikace přechodových charakteristik proporcionálních systémů. V úvodu jsou podrobně popsány vybrané metody identifikace a jejich postup. Veškeré výpočty jsou provedeny v programu MatLab/Simulink. Za účelem procvičení metod byl postup aplikován nejprve na testovací data. Dalším krokem je určení dynamických vlastností reálných modelů, pro což byl vybrán laboratorní model ventilátoru a teplovzdušný model. Zároveň jsou pro každý model vytvořeny statické charakteristiky.

V závěru jsou zhodnoceny dosažené výsledky a jsou porovnány přesnosti jednotlivých metod.

Klíčová slova: identifikace; modelování; aproximace; přechodová charakteristika; proporcionální systém

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

Bečka, M. *Selected Methods of Experimental Identification*. Ostrava: Department of Control Systems and Instrumentation, 2016. 69 p. Bachelor thesis, supervisor: Wagnerová, R.

This thesis deals with experimental identification of mathematical model of the step responses of proportional systems. The introduction describes in detail the chosen methods of identification and their practice. All calculations are done in MatLab / Simulink. In order to practice the methods the procedure has been at first applied to the test data. The next step is to determine dynamic properties of real models, for which the laboratory model of the fan and hot-air model were selected. At the same time, for each model were created static characteristics.

In conclusion, the results are evaluated and the accuracy of different methods is compared.

Key words: identification; modelling; approximation, step response; proportional system

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek.....	8
1 Úvod.....	10
2 Experimentální identifikace systémů.....	11
2.1 Aproximace přechodových charakteristik s aperiodickým průběhem – Strejcova metoda.....	11
2.2 Aproximace pomocí tečny v inflexním bodě.....	14
2.3 Aproximace pomocí sečny v inflexním bodě.....	15
2.4 Aproximace dvoubodovou metodou [Varianta č. 1].....	15
2.5 Aproximace dvoubodovou metodou [Varianta č. 2].....	17
2.6 Aproximace třibodovou metodou	17
3 Zpracování vygenerovaných dat.....	19
3.1 Úprava přechodové charakteristiky.....	19
3.2 Aproximace pomocí tečny v inflexním bodě.....	20
3.3 Aproximace pomocí sečny v bodě	22
3.4 Aproximace dvoubodovou metodou [Varianta č. 1].....	23
3.5 Aproximace dvoubodovou metodou [Varianta č. 2].....	24
3.6 Aproximace třibodovou metodou	26
4 Zpracování naměřených dat modelu ventilátoru	29
4.1 První experiment	30
4.1.1 Aproximace pomocí tečny v inflexním bodě.....	30
4.1.2 Aproximace pomocí sečny v bodě.....	32
4.1.3 Aproximace dvoubodovou metodou [Varianta č. 1]	33
4.1.4 Aproximace dvoubodovou metodou [Varianta č. 2]	34
4.1.5 Aproximace třibodovou metodou	35
4.2 Druhý experiment.....	39
4.3 Třetí experiment	41
4.3.1 První část třetího experimentu	42
4.3.2 Druhá část třetího experimentu	43
4.4 Čtvrtý experiment.....	46
4.4.1 První část čtvrtého experimentu	46

4.4.2	Druhá část čtvrtého experimentu	48
4.5	Statická charakteristika modelu	51
5	Zpracování naměřených dat teplovzdušného modelu	52
5.1	První experiment	53
5.1.1	Aproximace pomocí tečny/sečny v inflexním bodě	53
5.1.2	Aproximace dvoubodovou metodou [Varianta č. 1]	55
5.1.3	Aproximace dvoubodovou metodou [Varianta č. 2]	56
5.1.4	Aproximace třibodovou metodou	58
5.2	Druhý experiment.....	61
5.2.1	Aproximace pomocí tečny/sečny v inflexním bodě	62
5.2.2	Aproximace třibodovou metodou	63
5.3	Statická charakteristika modelu	65
6	Závěr.....	66
7	Literatura	69

Seznam použitých symbolů a zkratek

a_1, a_2, \dots, a_n	koefficienty jmenovatele obrazového přenosu,
b_1, b_2, \dots, b_n	koefficienty čitatele obrazového přenosu,
A	pomocná konstanta u vyhodnocení integračních soustav se setrvačností,
B	koefficient u tříbodové metody,
C	koefficient u tříbodové metody,
e	Eulorovo číslo,
$G(s)$	obrazový přenos,
$h(t)$	přechodová funkce,
i	index,
j	imaginární jednotka; index,
k	zesílení,
L	operátor přímé Laplaceovy transformace,
m	řád čitatele obrazového přenosu,
M_i	momenty u metody ploch,
n	řád jmenovatele obrazového přenosu,
s	komplexní proměnná u L-transformace,
S_i	obsahy ploch u metody ploch
t	čas [s],
T_o	časová konstanta u kmitavých členů 2. řádu [s],
T_1, T_2, \dots, T_n	časové konstanty [s],
T_d	časová konstanta dopravního zpoždění [s],
T_D	derivační časová konstanta [s],
T_I	integrační časová konstanta [s],
T_{on}	čas provedení zásahu
T_{off}	čas vypnutí zásahu
T_N	čas konce měření

u	akční veličina; vstupní proměnná,
y	výstupní veličina;
ϑ	logaritmický dekrement útlumu,
ζ	součinitel poměrného tlumení,
π	Ludolfovo číslo.

1 Úvod

Identifikace a modelování se používá při návrhu systémů řízení technologických procesů. Pomocí identifikace můžeme zjistit matematický model systému a jeho statické a dynamické vlastnosti. Metody identifikace se rozdělují na experimentální a analytické.

V rámci experimentálních metod je nutné provést měření přímo na daných systémech. Srovnáním hodnot signálu na vstupu a na výstupu se získá matematický model, kterým je systém popsán. Nevýhodou metod experimentálních je, že výsledky mohou být zkresleny vinou působení poruchových veličin.

V rámci analytických metod jsme schopni přesného stanovení vlastností objektu již před samotnou jeho realizací, pro to je ale nutné znát jeho přesnou strukturu.

Tato práce se zabývá metodami experimentální identifikace a jejich aplikací na vygenerovaná data i data reálných systémů (laboratorní model ventilátoru a teplovzdušný model). Cílem práce bude získání matematického modelu těchto laboratorních modelů na základě vyhodnocení jejich přechodových charakteristik a dále jejich srovnání z výsledky vygenerovaných dat.

2 Experimentální identifikace systémů

Účelem experimentální identifikace systémů je zjištění dynamických vlastností systému a určení jeho matematického modelu využitím experimentálních metod. Model systému se určí vyhodnocením záznamu odezvy měřených signálů, který byl získán působením testovacích signálů na systém.

Pro užití experimentálních metod identifikace je nutná existence zkoumaného objektu a možnost s ním experimentovat. Není nutná přesná znalost struktury systému, ale zvyšuje se náročnost na přístrojové vybavení.

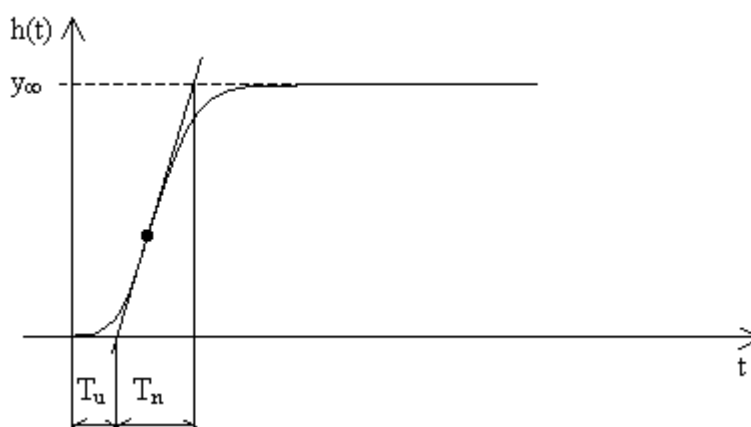
Identifikace systémů pomocí aproximace změřených přechodových charakteristik patří mezi deterministické metody. Použití je vhodné, je-li šum na výstupu měřené soustavy zanedbatelný.

2.1 Aproximace přechodových charakteristik s aperiodickým průběhem – Strejcova metoda

Vyazuje-li odezva systému aperiodický průběh, lze ji aproximovat pomocí proporcionální soustavy 2. řádu s rozdílnými časovými konstantami nebo proporcionální soustavou n -tého řádu se stejnými časovými konstantami. Volba soustavy záleží na hodnotě parametru τ , který se vypočte

$$\tau = \frac{T_u}{T_n} \quad (1)$$

kde T_u je doba průtahu a T_n doba náběhu.



Obr. 2.1 Přechodová charakteristika s aperiodickým průběhem a s vyznačenou dobou náběhu a dobou průtahu [http://www.352.vsb.cz]

Pokud parametr τ je menší než 0,1, volíme pro aproximaci obrazový přenos s rozdílnými časovými konstantami. Pokud je τ větší než 0,1, volíme obrazový přenos se stejnými časovými konstantami. Tedy

$\tau < 0,1 \Rightarrow$ aproximujeme přenosem typu

$$G(s) = \frac{k_1}{(T_1s + 1) \cdot (T_2s + 1)} \quad (2)$$

$\tau \geq 0,1 \Rightarrow$ aproximujeme přenosem typu

$$G(s) = \frac{k_1}{(Ts + 1)^n}. \quad (3)$$

a) **Proporcionální soustava 2. řádu s rozdílnými konstantami**

Parametry přenosu $G(s) = \frac{k_1}{(T_1s+1) \cdot (T_2s+1)}$ určíme následujícím postupem:

1. Zesílení k_1 vypočteme podle známého vztahu

$$k_1 = \frac{y(\infty)}{u(\infty)} \quad (4)$$

2. Pro hodnotu $0,72y_\infty$ odečteme z přechodové charakteristiky časový okamžik t_1 a vypočteme součet časových konstant T_1 a T_2 podle vztahu

$$T_1 + T_2 = \frac{t_1}{1,2564} \quad (5)$$

3. Vypočteme časový okamžik t_2 podle vzorce

$$t_2 = 0,3574 \cdot (T_1 + T_2) \quad (6)$$

4. Z grafu přechodové charakteristiky odečteme hodnotu $y(t_2)$

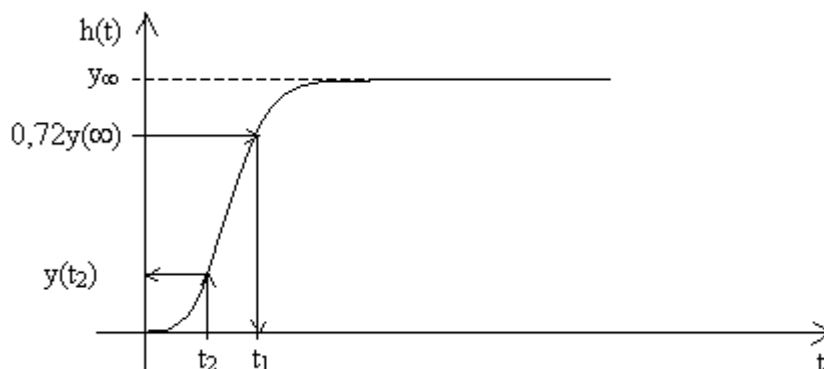
5. Podle tabulky 2.1 určíme poměr časových konstant τ_2

$$\tau_2 = \frac{T_1}{T_2} \quad (7)$$

6. Ze známého součtu a poměru časových konstant vypočteme T_1 a T_2 .

Tab. 2.1 Určení poměru časových konstant

$y(t_2)$	τ_2	$y(t_2)$	τ_2
0,30	0,000	0,22	0,183
0,29	0,023	0,21	0,219
0,28	0,043	0,20	0,264
0,27	0,063	0,19	0,322
0,26	0,084	0,18	0,403
0,25	0,105	0,17	0,538
0,24	0,128	0,16	1,000
0,23	0,154		



Obr. 2.2 Aproximace proporcionální soustavou 2. řádu s rozdílnými časovými konstantami

[<http://www.352.vsb.cz>]

b) Proporcionální soustava n -tého řádu se stejnými časovými konstantami

Parametry přenosu $G(s) = \frac{k_1}{(Ts+1)^n}$ určíme následujícím postupem:

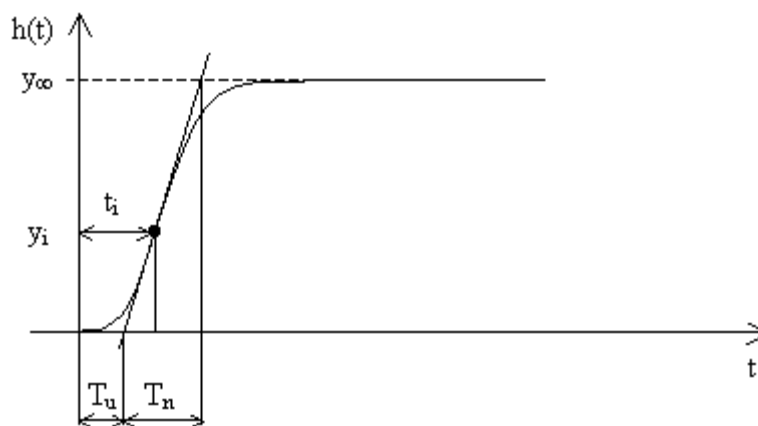
1. Zesílení k_1 vypočteme podle známého vztahu (4)
2. Přechodovou charakteristiku normujeme vzhledem k ustálené hodnotě y_∞
3. Sestrojíme tečnu v inflexním bodě a určíme τ podle vztahu

$$\tau = \frac{T_u}{T_n} \quad (8)$$

4. Podle hodnoty τ určíme z tab. 2.2 nejbližší vyšší řád n aproximační soustavy a souřadnici inflexního bodu y_i
5. Pomocí y_i určíme v grafu přechodové charakteristiky inflexní bod a odečteme souřadnici t_i
6. Hodnotu časové konstanty T určíme ze vztahu

$$T = \frac{t_i}{n-1}, \text{ resp. } T = \frac{t_i - T_d}{n-1} \text{ pro } T_d \neq 0 \quad (9)$$

kde t_i je souřadnice času v inflexním bodě přechodové charakteristiky, T_d časová konstanta dopravního zpoždění a n řád aproximační soustavy.



Obr. 2.3 Aproximace proporcionální soustavou n -tého řádu se stejnými časovými konstantami

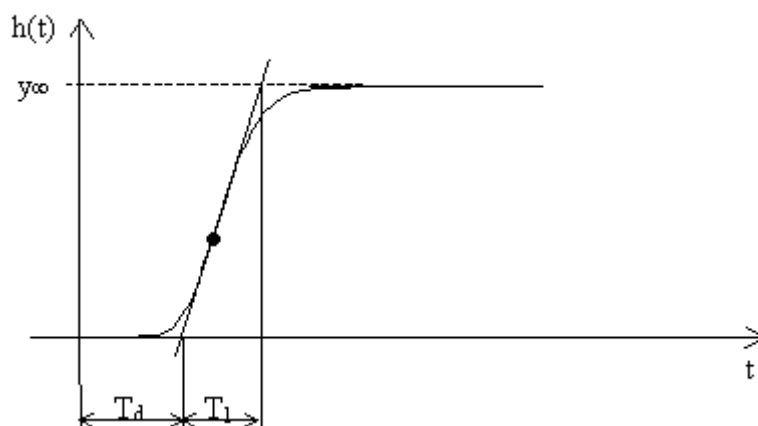
[<http://www.352.vsb.cz>]

Tab. 2.2 Stanovení řádu n aproximační soustavy a zpřesnění polohy inflexního bodu

N	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T	0,104	0,218	0,319	0,410	0,493	0,570	0,642	0,709	0,773
y_i	0,264	0,327	0,359	0,371	0,384	0,394	0,401	0,407	0,413

2.2 Aproximace pomocí tečny v inflexním bodě

V inflexním bodě přechodové charakteristiky sestojíme tečnu, pomocí které určíme časové konstanty T_d a T_1 , viz obr. 2.7. Zesílení k_I pak vypočteme podle vztahu (4).



Obr. 2.4 Aproximace přechodové charakteristiky pomocí tečny v inflexním bodě

[<http://www.352.vsb.cz>]

Takto získané hodnoty parametrů dosadíme do obrazového přenosu ve tvaru

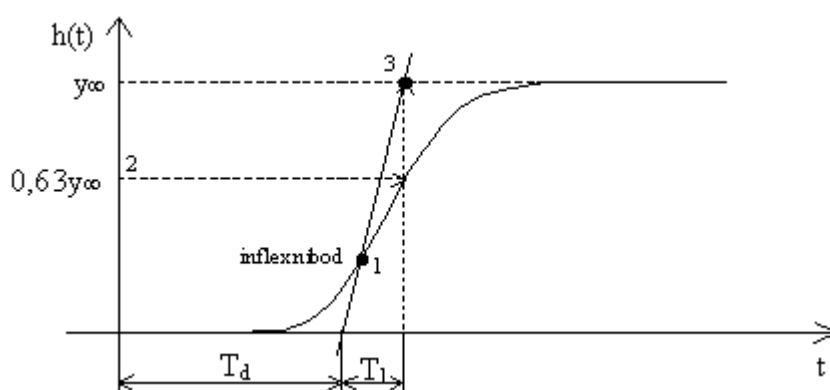
$$G(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} \cdot e^{-T_d s}. \quad (10)$$

2.3 Aproximace pomocí sečny v inflexním bodě

Tato metoda platí pro všechny členy druhého a vyššího řádu, je tedy velmi univerzální.

Parametry přenosu (10) určíme následujícím způsobem:

1. Stanovíme inflexní bod 1
2. Určíme hodnotu $0,63y_\infty$. Vyznačíme ji na přechodové charakteristice a najdeme pro tento časový okamžik bod 3 na pořadnici ustáleného stavu y_∞
3. Přímka procházející body 1 a 3 vytne na časové ose okamžik, který definuje dopravní zpoždění T_d a časovou konstantu T_1 . Zesílení k_1 vypočteme podle známého vztahu (3).



Obr. 2.5 Aproximace přechodové charakteristiky pomocí sečny v inflexním bodě

[<http://www.352.vsb.cz>]

2.4 Aproximace dvoubodovou metodou [Varianta č. 1]

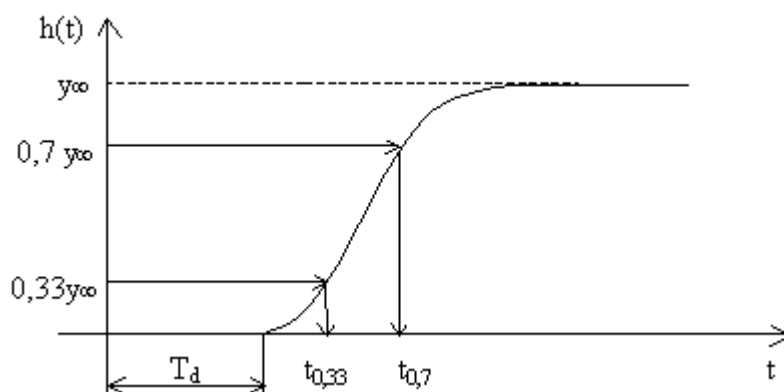
Parametry přenosu (10) určíme takto:

1. Stanovíme hodnoty $y_{0,7} = 0,7 \cdot y(\infty)$, $y_{0,33} = 0,33 \cdot y(\infty)$ a jim odpovídající časové okamžiky $t_{0,7}$ a $t_{0,33}$.
2. Z hodnot $t_{0,7}$ a $t_{0,33}$ vypočteme parametry přenosu podle vztahů:

$$T_d = 1,498 \cdot t_{0,33} - 0,498 \cdot t_{0,7} \quad (11)$$

$$T_1 = 1,245 \cdot (t_{0,7} - t_{0,33}) \quad (12)$$

3. Zesílení k_I se vypočte podle vztahu (3).



Obr. 2.6 Aproximace přechodové charakteristiky dvoubodovou metodou [varianta č. 1]

[<http://www.352.vsb.cz>]

U této metody lze také použít náhradní přenos regulované soustavy se setrvačností 2. řádu a dopravním zpožděním

$$G(s) = \frac{k_1}{(T_2 s + 1)^2} \cdot e^{-T_{d2}s} \quad (13)$$

kde

$$T_{d2} = 1,937 \cdot t_{0,33} - 0,937 \cdot t_{0,7} \quad (14)$$

$$T_{12} = 1,794 \cdot (t_{0,7} - t_{0,33}) \quad (15)$$

Pro rychlé převedení přenosu (10) na přenos (13) lze využít tabulky (2.3).

Tab. 2.3 Tabulka pro rychlý převod přenosů

$G(s) = \frac{k_1}{(T_i s + 1)^i} e^{-T_{di}s}$	i	1	2	3	4	5	6
$G(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-T_{d1}s}$	$\frac{T_1}{T_i}$	1	1,568	1,980	2,320	2,615	2,881
	$\frac{T_{d1} - T_{di}}{T_i}$	0	0,552	1,232	1,969	2,741	3,537
$G(s) = \frac{k_1}{(T_2 s + 1)^2} e^{-T_{d2}s}$	$\frac{T_2}{T_i}$	0,638	1	1,263	1,480	1,668	1,838
	$\frac{T_{d2} - T_{di}}{T_i}$	* -0,352	0	0,535	1,153	1,821	2,523

*Použitelné pro $T_{d1} > 0,352T_1$

2.5 Aproximace dvoubodovou metodou [Varianta č. 2]

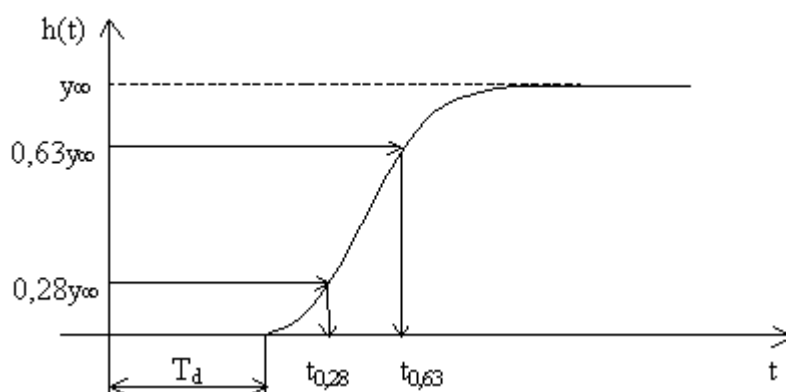
Parametry přenosu (10) určíme takto:

1. Stanovíme hodnoty $y_{0,7} = 0,7 \cdot y(\infty)$, $y_{0,33} = 0,33 \cdot y(\infty)$ a jim odpovídající časové okamžiky $t_{0,63}$ a $t_{0,28}$
2. Z hodnot $t_{0,63}$ a $t_{0,28}$ vypočteme parametry přenosu podle vztahů

$$T_d = 1,5 \cdot \left(t_{0,28} - \frac{1}{3} \cdot t_{0,63} \right) \quad (16)$$

$$T_1 = 1,5 \cdot (t_{0,63} - t_{0,28}) \quad (17)$$

3. Zesílení k_1 se vypočte podle vztahu (4).



Obr. 2.7 Aproximace přechodové charakteristiky dvoubodovou metodou [varianta č. 2]

[<http://www.352.vsb.cz>]

2.6 Aproximace tříbodovou metodou

Přechodovou charakteristiku soustavy aproximujeme přenosem ve tvaru

$$G(s) = \frac{k_1}{(T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1)} \cdot e^{-T_d s} \quad (18)$$

jehož parametry určíme následovně:

1. Stanovíme časové konstanty pro 9 procent, 26 procent a 70 procent ustálené hodnoty odezvy systému $t_{0,09}$, $t_{0,26}$ a $t_{0,7}$
2. Časovou konstantu dopravního zpoždění vypočteme podle vzorce

$$T_d = 2 \cdot t_{0,09} - t_{0,26} \quad (19)$$

3. Vypočteme koeficienty B a C podle vzorců

$$B = 0,83 \cdot t_{0,7} - 0,24 \cdot t_{0,26} + 0,48 \cdot t_{0,09} - T_d \quad (20)$$

$$C = 4 \cdot (t_{0,26} - t_{0,09})^2 \quad (21)$$

4. Vypočteme časové konstanty T_1 , T_2 a zesílení k_I podle vztahů

$$T_1 = \frac{B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot C}}{2} \quad (22)$$

$$T_2 = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot C}}{2}. \quad (23)$$

Přiléhavost S_e se počítá podle vzorce

$$S_e = \sum e^2 \rightarrow \min \quad (24)$$

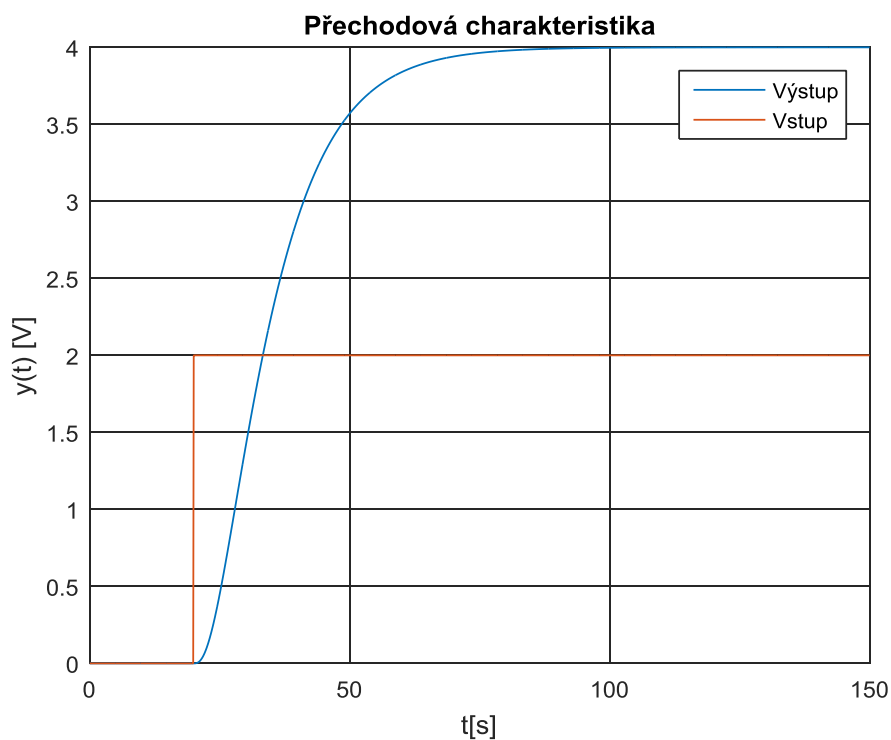
kde S_e je součet kvadrátů odchylek, e odchylka naměřené aproximované hodnoty přechodové charakteristiky a min minimum.

3 Zpracování vygenerovaných dat

Pro zpracování byla použita data ze souboru DATA1.mat z odkazu: http://fs1.vsb.cz/352/7_WAGNEROVA/Digital_CSD/MeasuredData/.

3.1 Úprava přechodové charakteristiky

Vstupní veličina byla skokově změněna v čase 20 sekund.

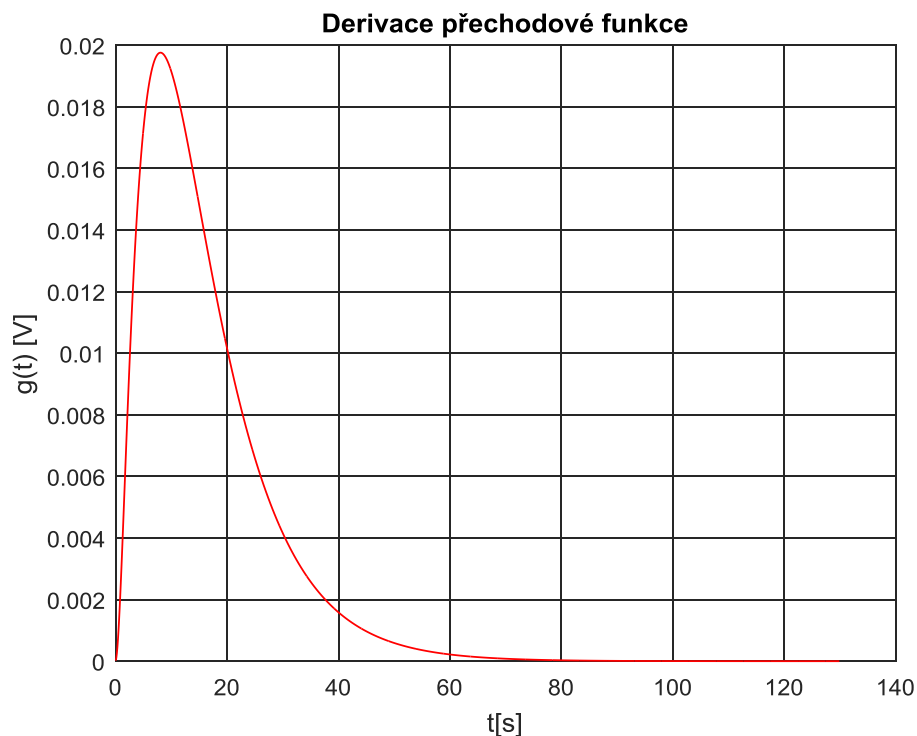


Obr. 3.1 Přechodová charakteristika systému z vygenerovaných dat

Původní přechodová charakteristika byla zkrácena o dobu 20 sekund, protože hodnota na vstupu byla po tuto dobu nulová. V dalším průběhu výpočtů je už takto zkrácená přechodová charakteristika používána automaticky.

3.2 Aproximace pomocí tečny v inflexním bodě

V programu Matlab byla provedena derivace přechodové charakteristiky a ve vrcholu jejího průběhu byl stanoven inflexní bod.



Obr. 3.2 Derivace přechodové charakteristiky systému z vygenerovaných dat

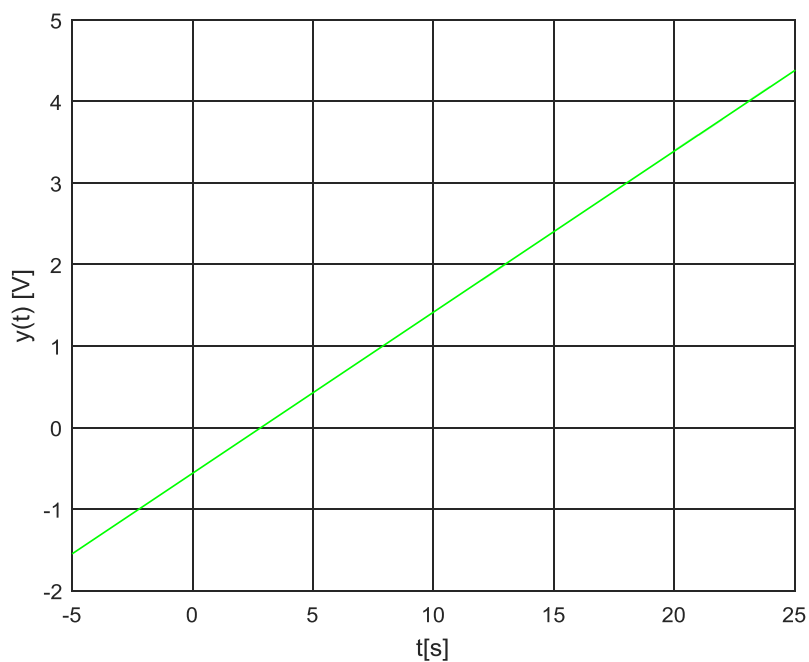
Ustálená hodnota výstupu byla stanovena z vygenerovaných hodnot a zesílení k_I bylo vypočteno podle známého vztahu (4).

$$u(\infty) = 2 \text{ V}$$

$$y(\infty) = 4 \text{ V}$$

$$k_I = 2$$

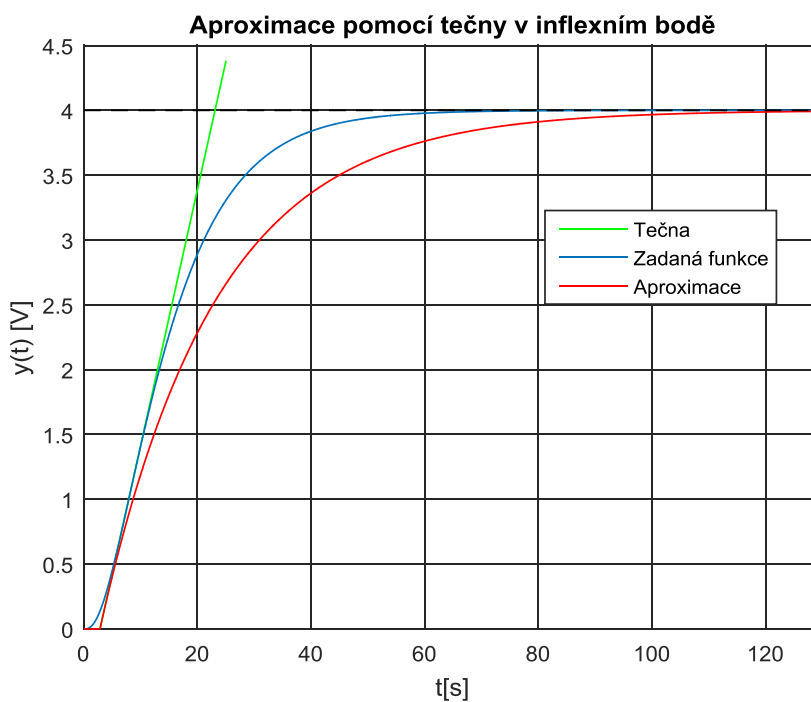
Dále byla pomocí funkce *plot* sestrojena tečna v inflexním bodě přechodové charakteristiky, pomocí které bylo v průsečíku tečny a časové osy určeno dopravní zpoždění T_d . V průsečíku tečny a ustálené hodnoty přechodové charakteristiky byl stanoven časový okamžik, ze kterého bylo možno odečtením dopravního zpoždění T_d zjistit hodnotu časové konstanty T_I .



Obr. 3.3 Vykreslení samostatné tečny v inflexním bodě

$$T_d = 2,842 \text{ s}$$

$$T_1 = 23,0918 - T_d = 23,092 - 2,843 = 20,249 \text{ s}$$



Obr. 3.4 Vykreslení aproximace pomocí tečny v inflexním bodě

Z dosažených výsledků byl definován přenos

$$G(s) = \frac{2}{20,249 \cdot s + 1} e^{-2,843s}$$

Poté byla vypočtena přiléhavost S_e podle vzorce (24).

$$S_e = 282,826$$

3.3 Aproximace pomocí sečny v bodě

Ustálená hodnota výstupu byla stanovena z vygenerovaných hodnot a zesílení k_I bylo vypočteno podle známého vztahu (4).

$$u(\infty) = 2 \text{ V}$$

$$y(\infty) = 4 \text{ V}$$

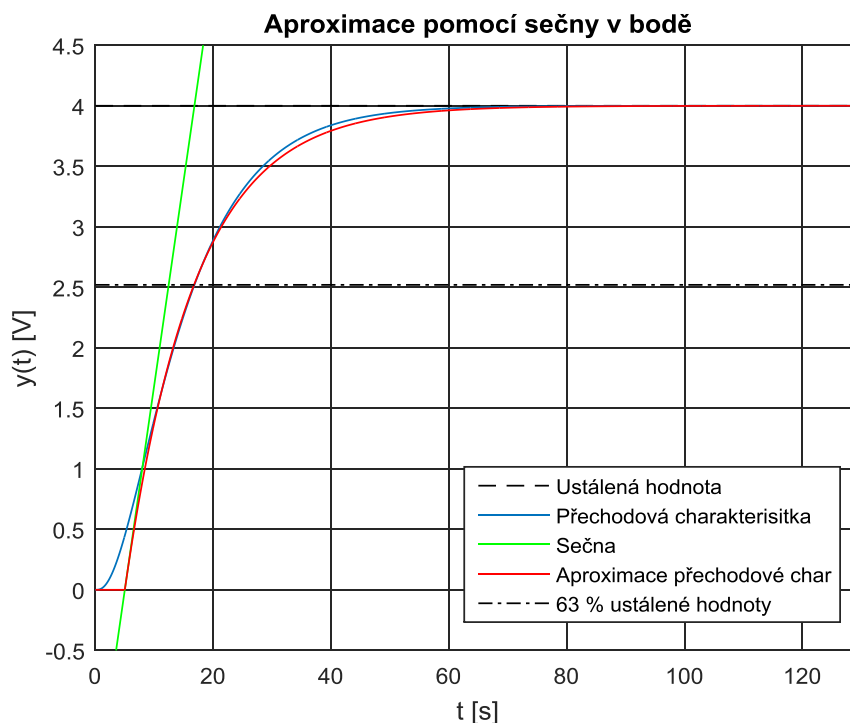
$$k_I = 2$$

Z derivace přechodové charakteristiky byl stanoven inflexní bod, dále bylo potřeba určit hodnotu 63 % výstupní veličiny $y(\infty)$, ta byla vyznačena na přechodové charakteristice a pro tento časový okamžik byl na přímce definující ustálenou hodnotu přechodové charakteristiky nalezen druhý bod potřebný pro sestrojení sečny přechodové charakteristiky.

$$y_{0,63} = 2,52 \rightarrow t_{0,63} = 16,806$$

$$T_d = 4,991 \text{ s}$$

$$T_1 = t_{0,63} - T_d = 16,806 - 4,991 = 11,815 \text{ s}$$



Obr. 3.5 Vykreslení aproximace pomocí sečny v inflexním bodě

Z dosažených výsledků byl definován přenos

$$G(s) = \frac{2}{11,8151 \cdot s + 1} e^{-4,9910s}$$

Poté byla vypočtena přiléhavost S_e podle vzorce (24).

$$S_e = 34,625$$

3.4 Aproximace dvoubodovou metodou [Varianta č. 1]

Ustálená hodnota výstupu byla stanovena z vygenerovaných hodnot a zesílení k_I bylo vypočteno podle známého vztahu (4).

$$u(\infty) = 2 \text{ V}$$

$$y(\infty) = 4 \text{ V}$$

$$k_I = 2$$

Poté byly stanoveny hodnoty 70 procent a 33 procent ustálené hodnoty výstupní veličiny $y(\infty)$ a jim odpovídající časové okamžiky

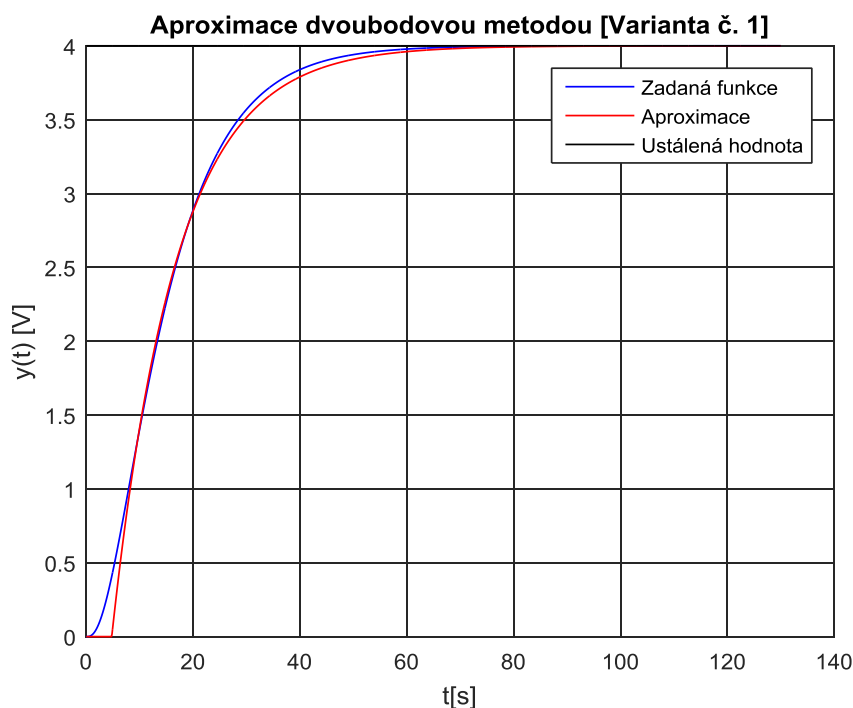
$$y_{0,70} = 2,80 \rightarrow t_{0,70} = 19,144$$

$$y_{0,33} = 1,32 \rightarrow t_{0,33} = 9,534$$

Z hodnot obou časových okamžiků byly vypočteny parametry přenosu:

$$T_d = 1,498 \cdot t_{0,33} - 0,498 \cdot t_{0,7} = 1,498 \cdot 9,534 - 0,498 \cdot 19,144 = 4,749 \text{ s}$$

$$T_1 = 1,245 \cdot (t_{0,7} - t_{0,33}) = 1,245 \cdot (19,144 - 9,534) = 11,964 \text{ s}$$



Obr. 3.6 Vykreslení aproximace 1. variantou dvoubodové metody

Z dosažených výsledků byl definován přenos

$$G(s) = \frac{2}{11,964 \cdot s + 1} e^{-4,749s}$$

Poté byla vypočtena přiléhavost S_e podle vzorce (24).

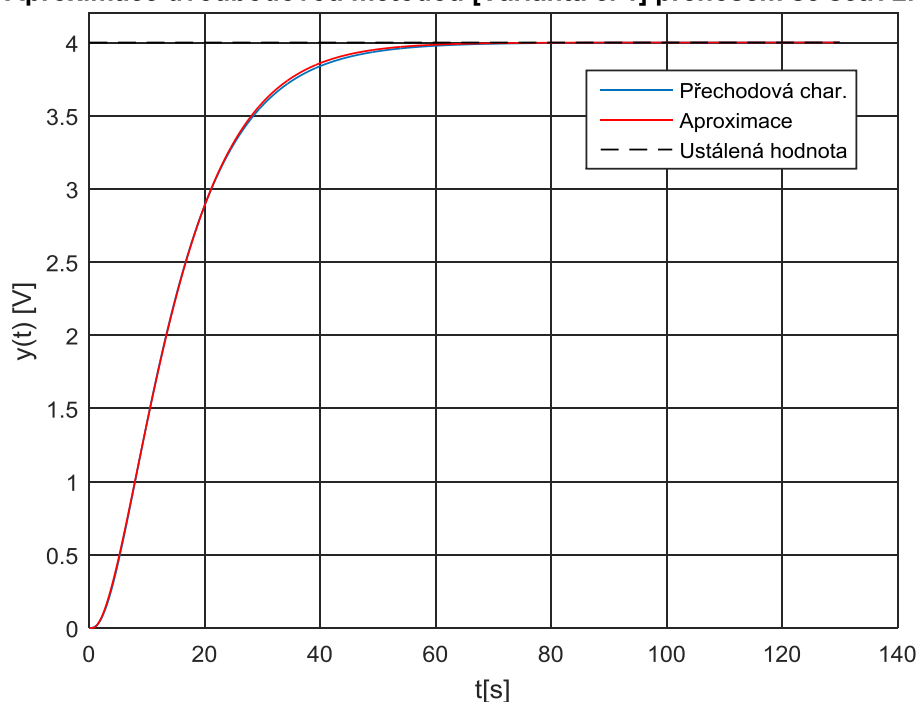
$$S_e = 34,129$$

Dále byl převeden na přenos se setrvačností 2. řádu podle vzorce (13).

$$T_2 = 0,638 \cdot T_1 = 0,638 \cdot 11,964 = 7,633 \text{ s}$$

$$T_{d2} = T_d - 0,352 \cdot T_1 = 4,749 - 0,352 \cdot 11,964 = 0,537 \text{ s}$$

Aproximace dvoubodovou metodou [Varianta č. 1] přenosem se setr. 2. řádu



Obr. 3.7 Vykreslení aproximace přenosu se setrvačností 2. řádu dvoubodovou metodou

Z dosažených výsledků byl definován přenos

$$G(s) = \frac{2}{(7,633 \cdot s + 1)^2} e^{-0,537 \cdot s}$$

Poté byla vypočtena přiléhavost S_e podle vzorce (24).

$$S_e = 8,548$$

3.5 Aproximace dvoubodovou metodou [Varianta č. 2]

Ustálená hodnota výstupu byla stanovena z vygenerovaných hodnot a zesílení k_I bylo vypočteno podle známého vztahu (4).

$$y(\infty) = 4 \text{ V}$$

$$k_I = 2$$

Dále byly stanoveny hodnoty 28 a 63 procent výstupní veličiny $y(\infty)$ a jim odpovídající časové okamžiky:

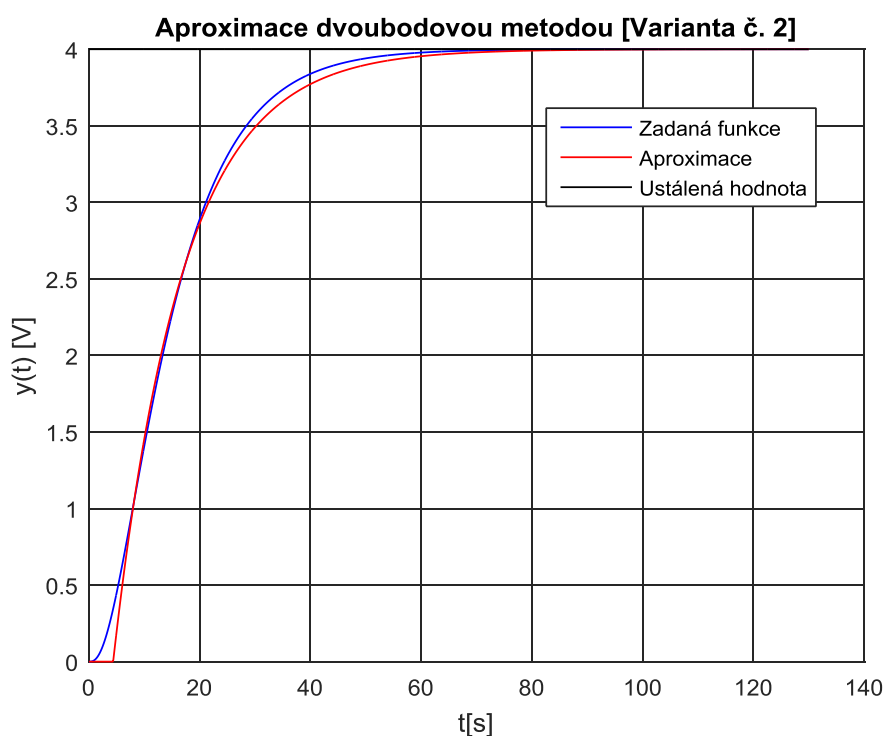
$$y_{0,63} = 2,52 \rightarrow t_{0,63} = 16,806$$

$$y_{0,28} = 1,12 \rightarrow t_{0,28} = 8,513$$

Z hodnot obou časových okamžiků byly vypočteny parametry přenosu:

$$T_d = 1,5 \cdot \left(t_{0,28} - \frac{1}{3} \cdot t_{0,63} \right) = 1,5 \cdot \left(8,513 - \frac{1}{3} \cdot 16,806 \right) = 4,366 \text{ s}$$

$$T_1 = 1,5 \cdot (t_{0,63} - t_{0,28}) = 1,5 \cdot (16,806 - 8,513) = 12,440 \text{ s}$$



Obr. 3.8 Vykreslení aproximace 2. variantou dvoubodové metody

Z dosažených výsledků byl definován přenos:

$$G(s) = \frac{2}{12,440s + 1} e^{-4,366s}$$

Poté byla vypočtena přiléhavost S_e podle vzorce (24).

$$S_e = 39,5418$$

Dále byl proveden pokus o převedení na přenos se setrvačností 2. řádu, ale nebyla splněna podmínka $T_{dl} > 0,352T_l$.

3.6 Aproximace třibodovou metodou

Ustálená hodnota výstupu byla stanovena z vygenerovaných hodnot a zesílení k_I bylo vypočteno podle známého vztahu (4).

$$y(\infty) = 4 \text{ V}$$

$$k_I = 2$$

Dále byly stanoveny hodnoty 9, 26 a 70 procent ustálené hodnoty výstupní veličiny $y(\infty)$ a jim odpovídající časové okamžiky

$$y_{0,09} = 0,36 \rightarrow t_{0,09} = 4,4595$$

$$y_{0,26} = 1,04 \rightarrow t_{0,26} = 8,1078$$

$$y_{0,70} = 2,80 \rightarrow t_{0,70} = 19,1440$$

Následně byla vypočtena časová konstanta dopravního zpoždění

$$T_d = 2 \cdot t_{0,09} - t_{0,26} = 2 \cdot 4,4595 - 8,1078 = 0,8112 \text{ s}$$

Výpočet koeficientů B a C :

$$B = 0,83 \cdot t_{0,7} - 0,24 \cdot t_{0,26} + 0,48 \cdot t_{0,09} - T_d$$

$$B = 0,83 \cdot 19,1440 - 0,24 \cdot 8,1078 + 0,48 \cdot 4,4595 - 0,8112 = 15,273$$

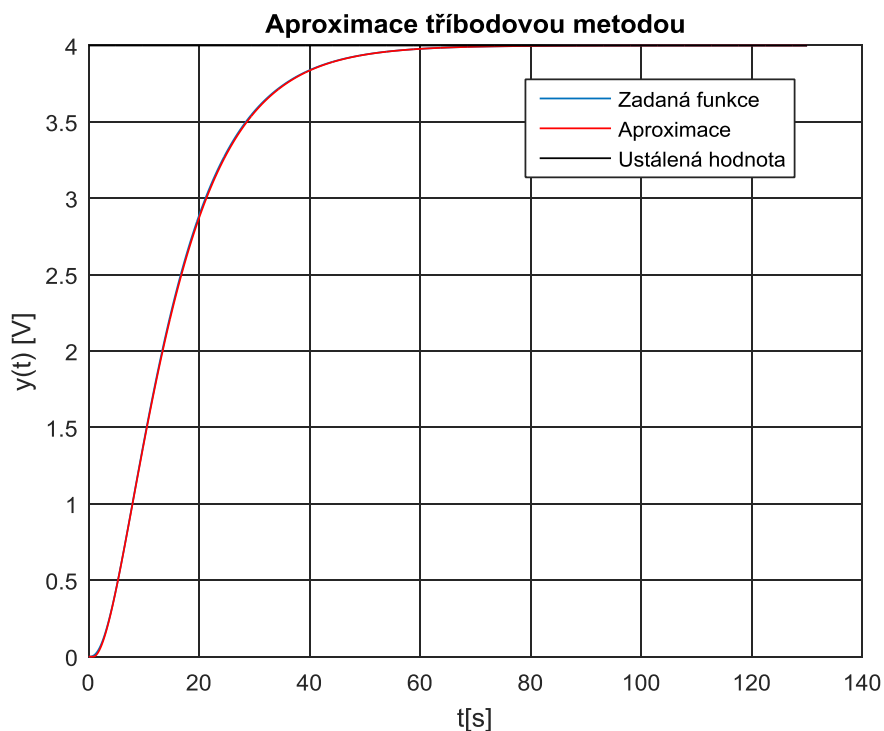
$$C = 4 \cdot (t_{0,26} - t_{0,09})^2$$

$$C = 4 \cdot (8,1078 - 4,4595)^2 = 53,244$$

Výpočet časových konstant T_1 a T_2 :

$$T_1 = \frac{B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot C}}{2} = \frac{15,2730 + \sqrt{15,2730^2 - 4 \cdot 53,2404}}{2} = 9,889 \text{ s}$$

$$T_2 = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot C}}{2} = \frac{15,2730 - \sqrt{15,2730^2 - 4 \cdot 53,2404}}{2} = 5,384 \text{ s}$$



Obr. 3.9 Vykreslení aproximace třibodovou metodou

Z dosažených výsledků byl definován přenos:

$$G(s) = \frac{2}{(9,8894 \cdot s + 1) \cdot (5,3836 \cdot s + 1)} e^{-0,8112s}$$

Poté byla vypočtena přiléhavost S_e podle vzorce (24).

$$S_e = 4,0713$$

Označení metod použitých pro identifikaci

M1 – aproximace pomocí tečny v inflexním bodě

M2 – aproximace pomocí sečny v inflexním bodě

M3 – aproximace dvoubodovou metodou [variant č. 1]

M4 – aproximace dvoubod. metodou [var. č. 1] přenosem se setrvačností 2. řádu

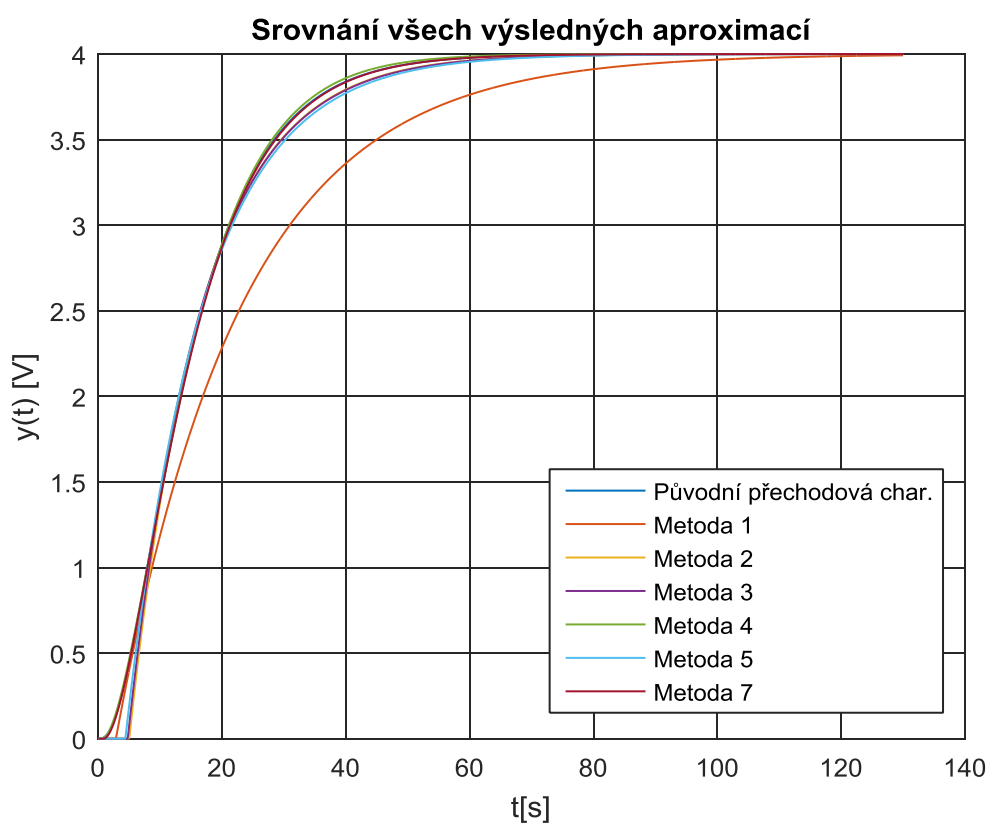
M5 – aproximace dvoubodovou metodou [variant č. 2]

M6 – aproximace dvoubod. metodou [var. č. 2] přenosem se setrvačností 2. řádu

M7 – aproximace třibodovou metodou

Tab. 3.1 Srovnání výsledků metod aproximace vygenerovaných dat

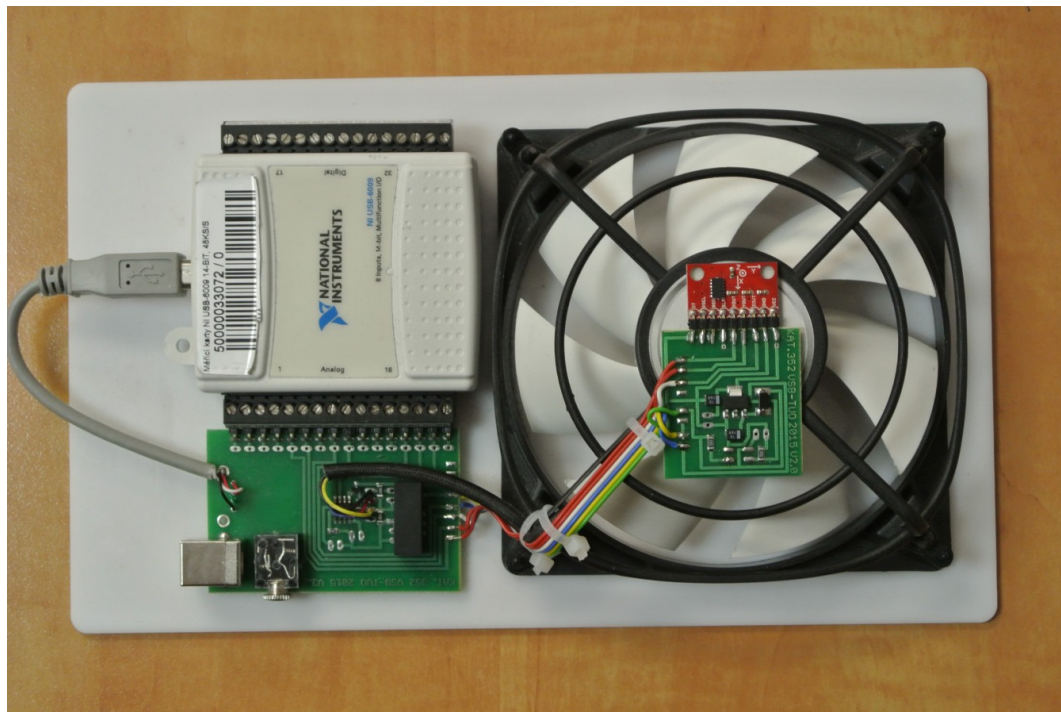
Metoda	Obrazový přenos	Přiléhavost
M1	$G(s) = \frac{2}{20,2486 \cdot s + 1} e^{-2,8432s}$	282,826
M2	$G(s) = \frac{2}{11,8151 \cdot s + 1} e^{-4,9910s}$	34,625
M3	$G(s) = \frac{2}{11,9642 \cdot s + 1} e^{-4,7485s}$	34,129
M4	$G(s) = \frac{2}{(7,633 \cdot s + 1)^2} e^{-0,537 \cdot s}$	8,548
M5	$G(s) = \frac{2}{12,4396s + 1} e^{-4,3665s}$	39,542
M7	$G(s) = \frac{2}{(9,8894 \cdot s + 1) \cdot (5,3836 \cdot s + 1)} e^{-0,8112s}$	4,071



Obr. 3.10 Srovnání všech výsledných aproximací prvního experimentu s původní přechodovou charakteristikou

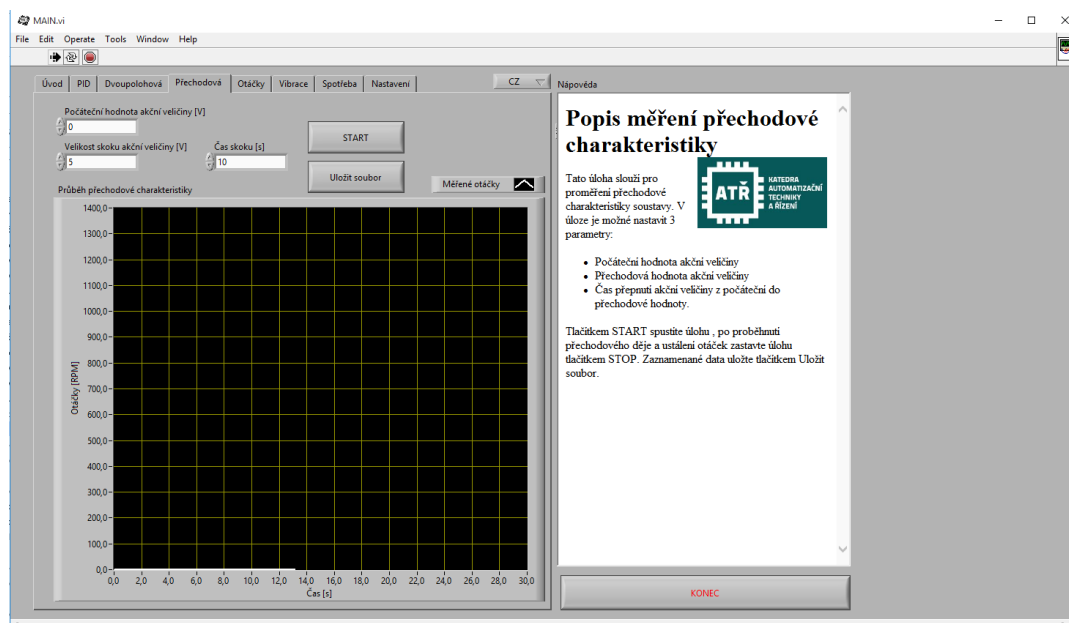
4 Zpracování naměřených dat modelu ventilátoru

Celé měření se skládalo ze čtyř experimentů. Za účelem dosažení dostatečně přesných výsledků bylo při každém experimentu provedeno pět měření a z nich byla vytvořena průměrná hodnota.



Obr. 4.1 Laboratorní model ventilátoru z laboratoře F233

K ovládání modelu a měření přechodových charakteristik byl použit program Fan Control 3.1 v laboratoři F233.



Obr. 4.2 Software použitý k ovládání modelu a měření přechodových charakteristik

4.1 První experiment

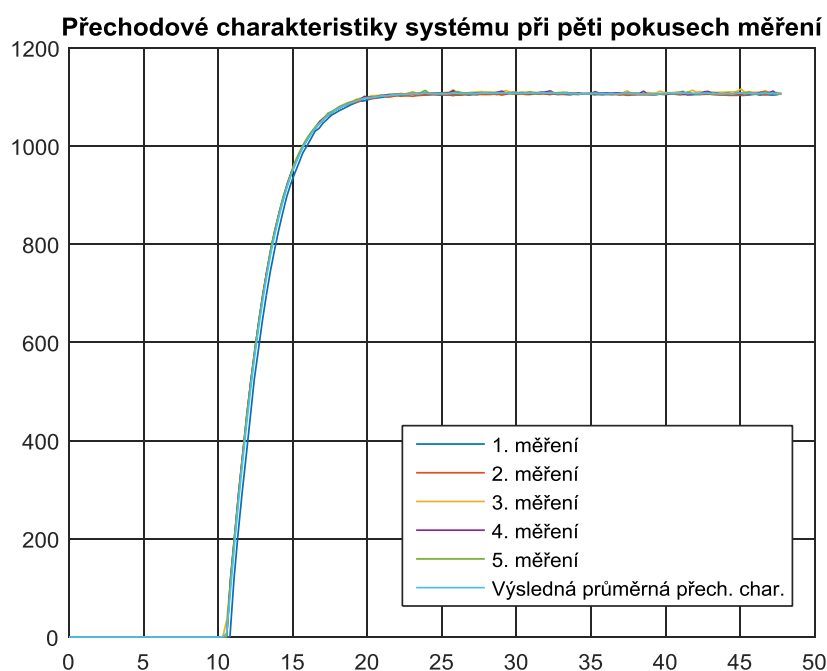
Při tomto experimentu bylo zvoleno počáteční napětí nulové a v čase 10 s došlo ke skoku akční veličiny na hodnotu 5 V. Vzhledem k tomu, že šířka časového okna byla 50 s, každé jednotlivé měření trvalo právě tuto dobu.

Počáteční hodnota – 0 V

Velikost skoku akční veličiny – 5 V

Čas skoku – 10 s

Šířka časového okna – 50 s



Obr. 4.3 Přechodové charakteristiky pěti měření ve srovnání s průměrnou přechodovou charakteristikou za podmínek prvního experimentu

Vstupní veličina byla skokově změněna v čase 10 s, a z toho důvodu byla přechodová charakteristika zkrácena o tuto hodnotu.

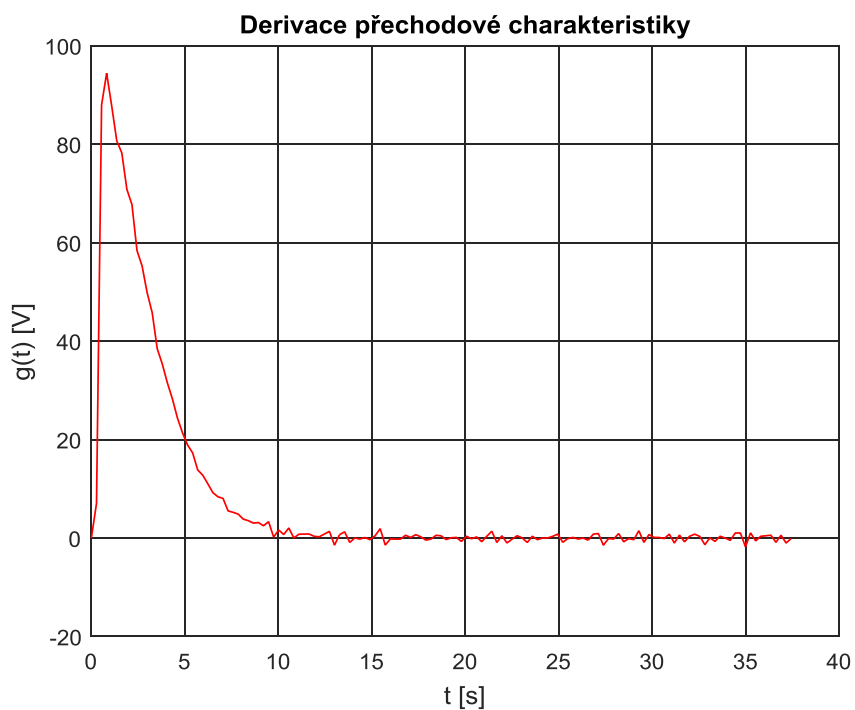
4.1.1 Aproximace pomocí tečny v inflexním bodě

Ustálená hodnota výstupu byla stanovena z naměřených hodnot a zesílení k_I bylo vypočteno podle známého vztahu (4).

$$u(\infty) = 5 \text{ V}$$

$$y(\infty) = 1106,3 \text{ V}$$

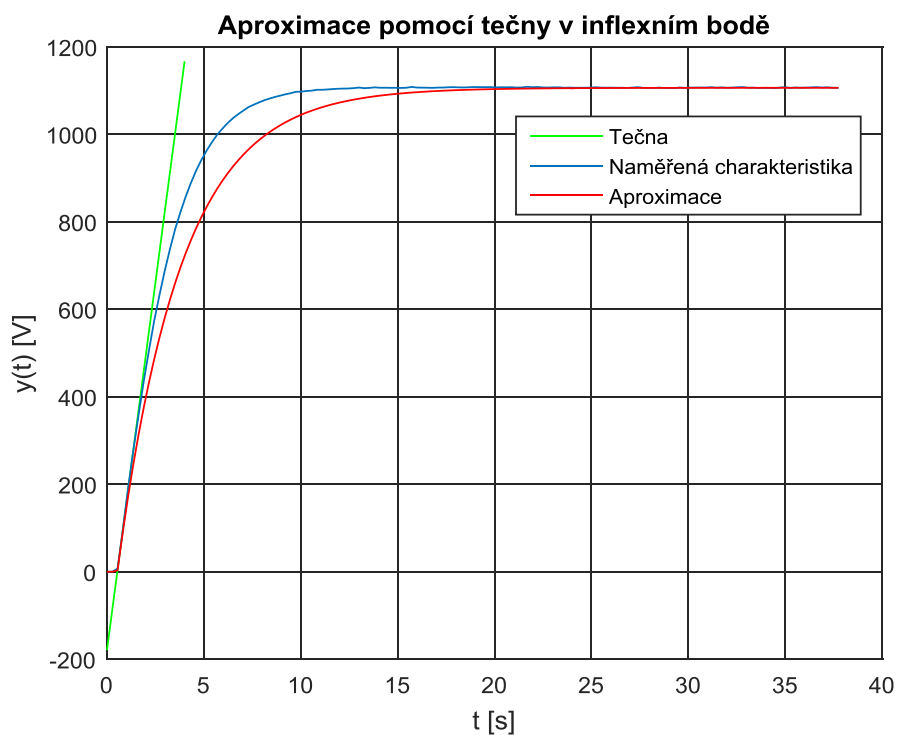
$$k_I = 221,27$$



Obr. 4.4 Derivace přechodové charakteristiky prvního experimentu

$$T_d = 0,533 \text{ s}$$

$$T_1 = 3,825 - T_d = 3,825 - 0,533 = 3,292 \text{ s}$$



Obr. 4.5 Vykreslení aproximace pomocí tečny v inflexním bodě

Z dosažených výsledků byl definován přenos

$$G(s) = \frac{221,267}{3,292 \cdot s + 1} e^{-0,533s}$$

Poté byla vypočtena přiléhavost S_e podle vzorce (24).

$$S_e = 3890,600$$

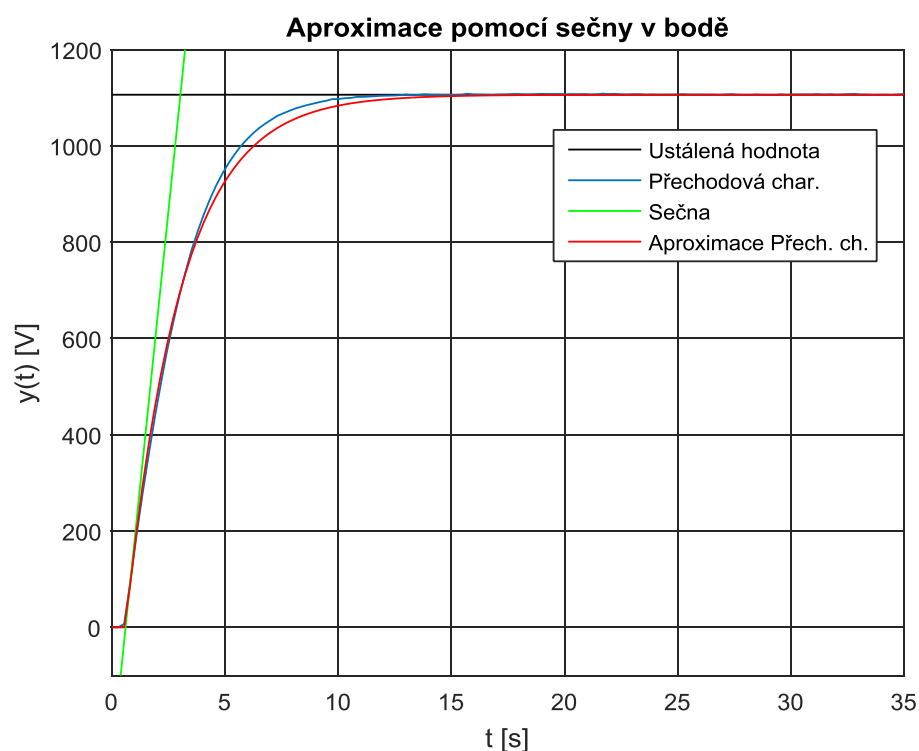
4.1.2 Aproximace pomocí sečny v bodě

Z derivace přechodové charakteristiky byl stanoven inflexní bod, dále bylo potřeba určit hodnotu 63 % výstupní veličiny $y(\infty)$, ta byla vyznačena na přechodové charakteristice a pro tento časový okamžik byl na přímce definující ustálenou hodnotu přechodové charakteristiky nalezen druhý bod potřebný pro sestrojení sečny přechodové charakteristiky.

$$y_{0,63} = 696,969 \rightarrow t_{0,63} = 3,030$$

$$T_d = 0,608 \text{ s}$$

$$T_1 = t_{0,63} - T_d = 3,030 - 0,608 = 2,422 \text{ s}$$



Obr. 4.6 Vykreslení aproximace pomocí sečny v inflexním bodě

Z dosažených výsledků byl definován přenos

$$G(s) = \frac{221,267}{2,422 \cdot s + 1} e^{-0,608s}$$

Poté byla vypočtena přiléhavost S_e podle vzorce (24).

$$S_e = 869,282$$

4.1.3 Aproximace dvoubodovou metodou [Varianta č. 1]

Byly stanoveny hodnoty 70 procent a 33 procent ustálené hodnoty výstupní veličiny $y(\infty)$ a jim odpovídající časové okamžiky

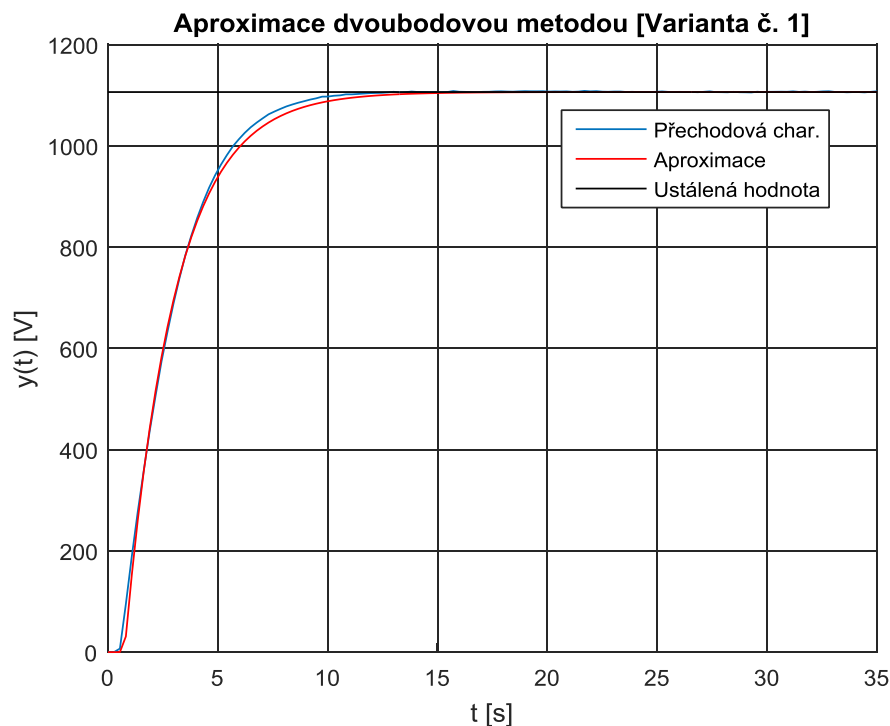
$$y_{0,70} = 774,410 \rightarrow t_{0,70} = 3,467$$

$$y_{0,33} = 365,069 \rightarrow t_{0,33} = 1,653$$

Z hodnot obou časových okamžiků byly vypočteny parametry přenosu:

$$T_d = 1,498 \cdot t_{0,33} - 0,498 \cdot t_{0,7} = 1,498 \cdot 1,653 - 0,498 \cdot 3,467 = 0,750 \text{ s}$$

$$T_1 = 1,245 \cdot (t_{0,7} - t_{0,33}) = 1,245 \cdot (3,467 - 1,653) = 2,258 \text{ s}$$



Obr. 4.7 Vykreslení aproximace variantou č. 1 dvoubodové metody

Z dosažených výsledků byl definován přenos:

$$G(s) = \frac{221,267}{2,258 \cdot s + 1} e^{-0,750s}$$

Poté byla vypočtena přiléhavost S_e podle vzorce (24).

$$S_e = 640,730$$

Dále byl proveden pokus o převedení na přenos se setrvačností 2. řádu, ale nebyla splněna podmínka $T_{dl} > 0,352T_l$.

4.1.4 Aproximace dvoubodovou metodou [Varianta č. 2]

Byly stanoveny hodnoty 28 a 63 procent výstupní veličiny $y(\infty)$ a jim odpovídající časové okamžiky:

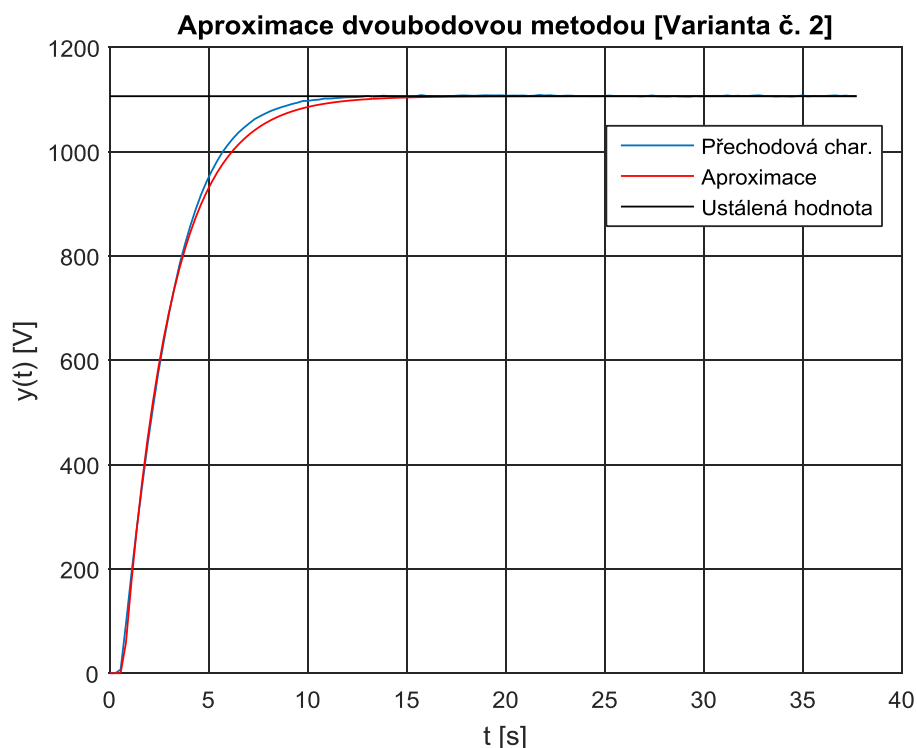
$$y_{0,63} = 696,969 \rightarrow t_{0,63} = 3,0297$$

$$y_{0,28} = 309,764 \rightarrow t_{0,28} = 1,4666$$

Z hodnot obou časových okamžiků byly vypočteny parametry přenosu:

$$T_d = 1,5 \cdot \left(t_{0,28} - \frac{1}{3} \cdot t_{0,63} \right) = 1,5 \cdot \left(1,467 - \frac{1}{3} \cdot 3,030 \right) = 0,686 \text{ s}$$

$$T_1 = 1,5 \cdot (t_{0,63} - t_{0,28}) = 1,5 \cdot (3,030 - 1,467) = 2,345 \text{ s}$$



Obr. 4.8 Vykreslení aproximace variantou č. 2 dvoubodové metody

Z dosažených výsledků byl definován přenos:

$$G(s) = \frac{221,267}{2,345s + 1} e^{-0,686s}$$

Poté byla vypočtena přiléhavost S_e podle vzorce (24).

$$S_e = 739,985$$

Dále byl proveden pokus o převedení na přenos se setrvačností 2. řádu, ale nebyla splněna podmínka $T_{dI} > 0,352T_I$.

4.1.5 Aproximace tříbodovou metodou

Byly stanoveny hodnoty 9, 26 a 70 procent ustálené hodnoty výstupní veličiny $y(\infty)$ a jim odpovídající časové okamžiky

$$y_{0,09} = 99,567 \rightarrow t_{0,09} = 0,829$$

$$y_{0,26} = 287,638 \rightarrow t_{0,26} = 1,392$$

$$y_{0,70} = 774,410 \rightarrow t_{0,70} = 3,467$$

Následně byla vypočtena časová konstanta dopravního zpoždění

$$T_d = 2 \cdot t_{0,09} - t_{0,26} = 2 \cdot 0,829 - 1,392 = 0,266 \text{ s}$$

Výpočet koeficientů B a C :

$$B = 0,83 \cdot t_{0,7} - 0,24 \cdot t_{0,26} + 0,48 \cdot t_{0,09} - T_d$$

$$B = 0,83 \cdot 3,467 - 0,24 \cdot 1,392 + 0,48 \cdot 0,829 - 0,266 = 2,675$$

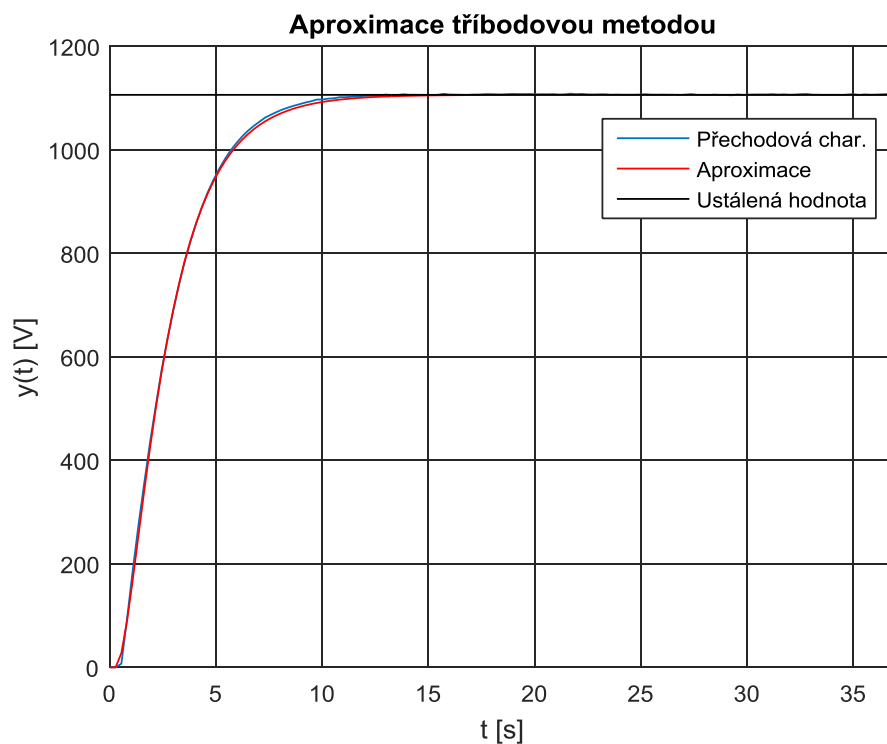
$$C = 4 \cdot (t_{0,26} - t_{0,09})^2$$

$$C = 4 \cdot (1,392 - 0,829)^2 = 1,269$$

Výpočet časových konstant T_1 a T_2 :

$$T_1 = \frac{B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot C}}{2} = \frac{2,675 + \sqrt{2,675^2 - 4 \cdot 1,269}}{2} = 2,059 \text{ s}$$

$$T_2 = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot C}}{2} = \frac{2,675 - \sqrt{2,675^2 - 4 \cdot 1,269}}{2} = 0,616 \text{ s}$$



Obr. 4.9 Vykreslení aproximace třibodovou metodou

Z dosažených výsledků byl definován přenos:

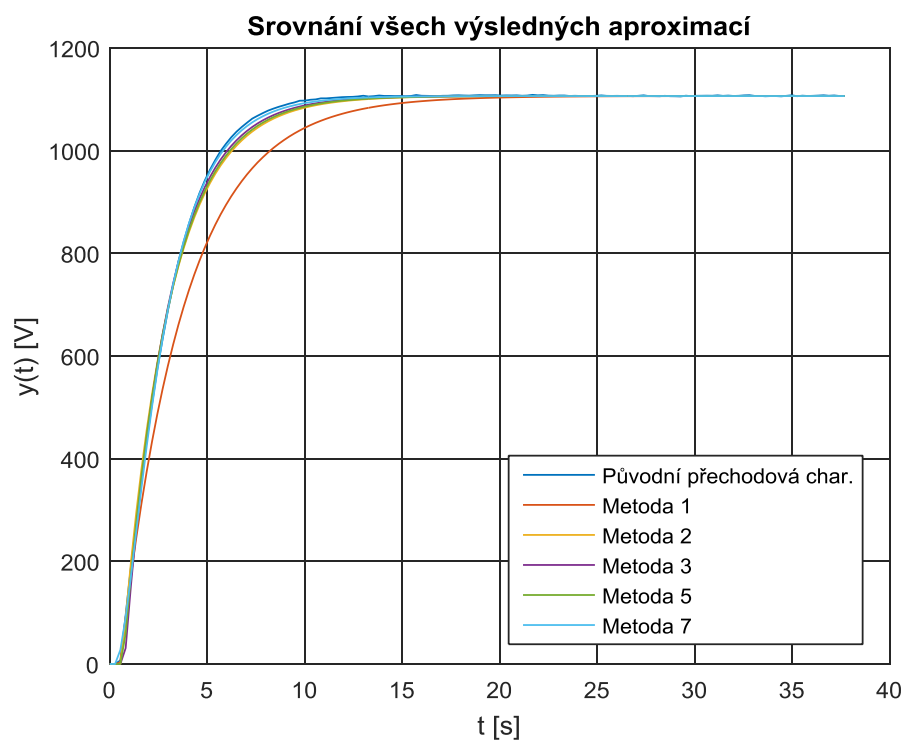
$$G(s) = \frac{221,267}{(2,059 \cdot s + 1) \cdot (0,616 \cdot s + 1)} e^{-0,266s}$$

Poté byla vypočtena přiléhavost S_e podle vzorce (24).

$$S_e = 340,850$$

Tab. 4.1 Srovnání výsledků metod aproximace naměřených dat při prvním experimentu

Metoda	Obrazový přenos	Přiléhavost
M1	$G(s) = \frac{221,267}{3,292 \cdot s + 1} e^{-0,533s}$	3890,600
M2	$G(s) = \frac{221,267}{2,422 \cdot s + 1} e^{-0,608s}$	869,282
M3	$G(s) = \frac{221,267}{2,258 \cdot s + 1} e^{-0,750s}$	640,730
M5	$G(s) = \frac{221,267}{2,345s + 1} e^{-0,686s}$	739,985
M7	$G(s) = \frac{221,267}{(2,059 \cdot s + 1) \cdot (0,616 \cdot s + 1)} e^{-0,266s}$	340,850



Obr. 4.10 Srovnání všech výsledných aproximací prvního experimentu s původní přechodovou charakteristikou

Pro každou metodu byl vytvořen skript v prostředí programu Matlab, který je do jisté míry univerzální, a dá se tedy použít na jakýkoliv experiment. Individuální parametry jsou na 2, 3, 9, 10 a 17, tyto se mění v závislosti na chování systému.

```
1 - load('Prechod_comp.mat')
2 - y=output(1000:3999);
3 - t=tout(1:3000);
4 - plot(t,y)
5 - grid on
6 - hold on
7 - y070=y(3000)*0.7
8 - y033=y(3000)*0.33
9 - t070=4.9344
10 - t033=2.8345
11 - Td=1.498*t033-0.498*t070
12 - T1=1.245*(t070-t033)
13 - k1=(y(3000)-y(1))/(5-0)
14 - GA=tf([k1],[T1 1],'iodelay',Td)
15 - xlabel('t [s]')
16 - ylabel('y(t) [V]')
17 - h=step(GA*5,t)+y(1);
18 - plot(t,h,'r')
19 - hold on
20 - yust=(0*y)+y(3000);
21 - plot(t,yust,'k--')
22 - legend('Přechodová char.','Aproximace','Ustálená hodnota')
23 - title('Aproximace dvoubodovou metodou [Var. č. 1]')
24 - S=sum(abs(h-y))
```

Obr. 4.11 Příklad skriptu vytvořeného v programu Matlab

4.2 Druhý experiment

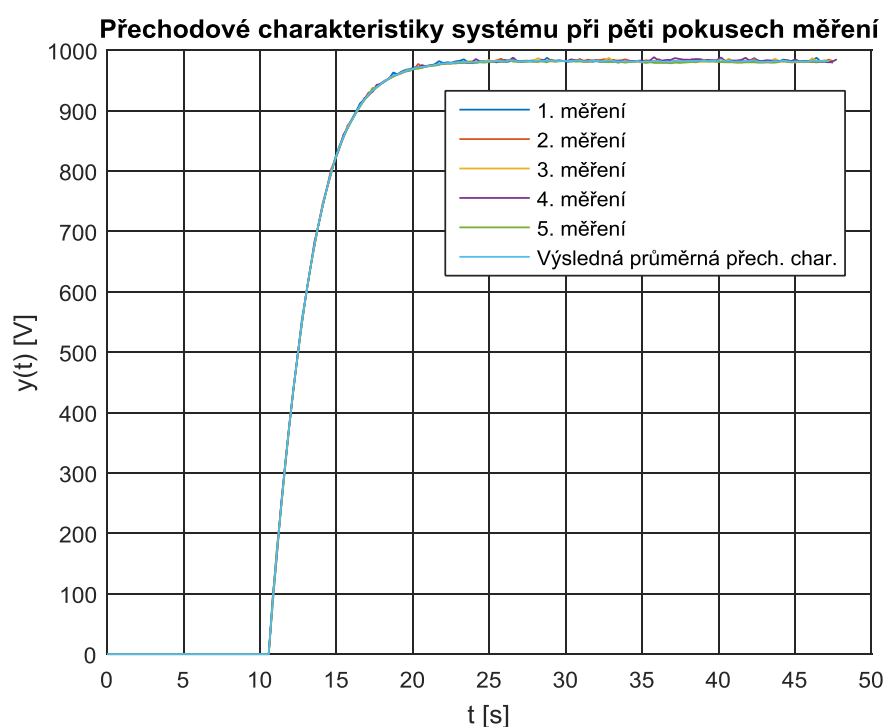
Počáteční podmínky byly velmi podobné prvnímu experimentu s tím rozdílem, že byla zvolena nižší velikost skoku akční veličiny v souvislosti s prověřením citlivosti systému. Počáteční napětí bylo nulové a v čase 10 s došlo ke skoku akční veličiny na hodnotu 3 V. Šířka časového okna byla 50 s.

Počáteční hodnota – 0 V

Velikost skoku akční veličiny – 3 V

Čas skoku – 10 s

Šířka časového okna – 50 s

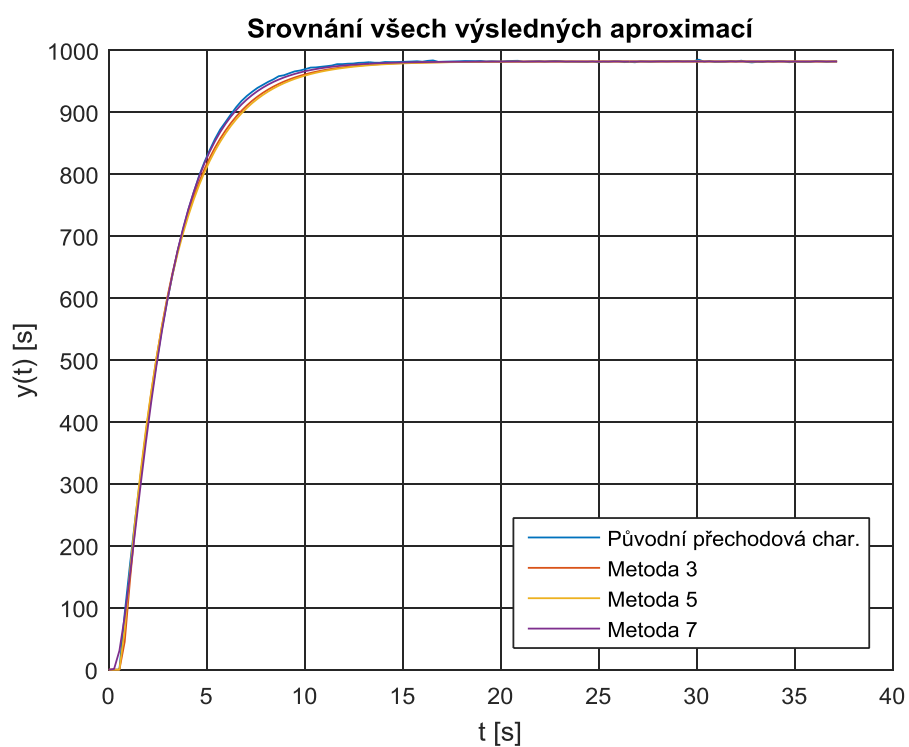


Obr. 4.12 Přechodové charakteristiky pěti měření ve srovnání s průměrnou přechodovou charakteristikou za podmínek druhého experimentu

V dalším průběhu experimentu se postupovalo identicky jako v předchozím. Z toho důvodu jsou dále popsány postupy aproximací jen u těch metod, u kterých nastala komplikace.

Tab. 4.2 Srovnání výsledků metod aproximace naměřených dat při druhém experimentu

Metoda	Obrazový přenos	Přiléhavost
M3	$G(s) = \frac{327,366}{2,414 \cdot s + 1} e^{-0,697s}$	535,424
M5	$G(s) = \frac{327,366}{2,487s + 1} e^{-0,643s}$	614,050
M7	$G(s) = \frac{327,366}{(2,185 \cdot s + 1) \cdot (0,644 \cdot s + 1)} e^{-0,211s}$	294,653



Obr. 4.13 Srovnání všech výsledných aproximací s původní přechodovou charakteristikou

4.3 Třetí experiment

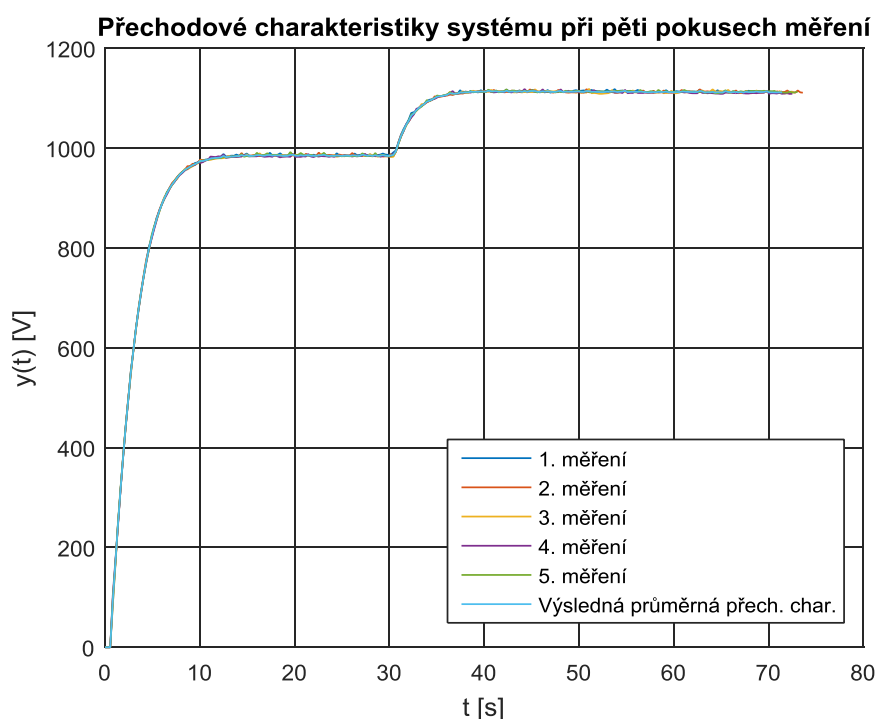
Počáteční podmínky se od prvního a druhého experimentu znatelně lišily, a to především v tom, že počáteční hodnota napětí byla nenulová. Počáteční napětí bylo 3 V a v čase 30 s došlo ke skoku akční veličiny na hodnotu 5 V . Šířka časového okna byla 80 s .

Počáteční hodnota – 3 V

Velikost skoku akční veličiny – 5 V

Čas skoku – 30 s

Šířka časového okna – 80 s



Obr. 4.14 Přechodové charakteristiky pěti měření ve srovnání s průměrnou přechodovou charakteristikou za podmínek třetího experimentu

Vstupní veličina byla skokově změněna v čase 30 s , a z toho důvodu bylo potřeba přechodovou charakteristiku rozdělit na dvě části. V dalším průběhu experimentu se postupuje identicky jako v předchozích, s tím rozdílem, že u tohoto experimentu budou dvě separovaná vyhodnocení.

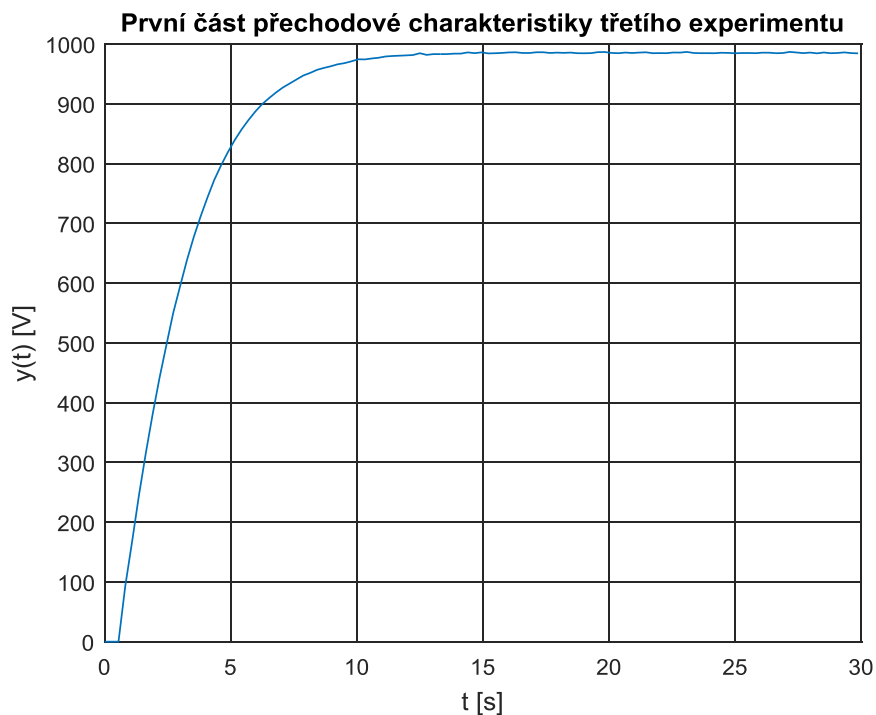
4.3.1 První část třetího experimentu

Ustálená hodnota výstupu byla stanovena z naměřených hodnot a zesílení k_I bylo vypočteno podle známého vztahu (4).

$$u(\infty) = 3 \text{ V}$$

$$y(\infty) = 984,270 \text{ V}$$

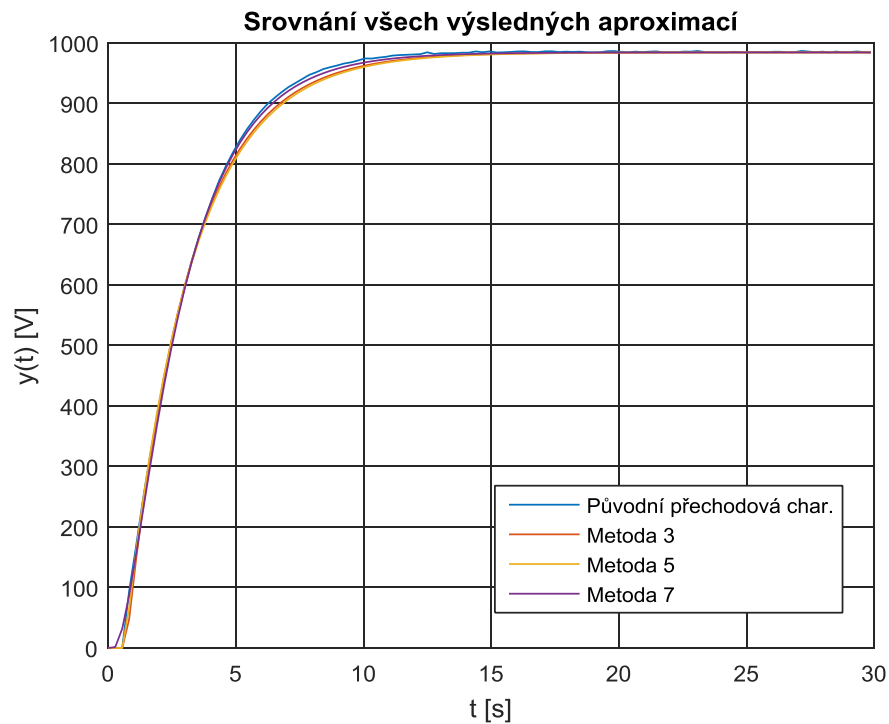
$$k_1 = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)} = \frac{984,270 - 0}{3 - 0} = 328,090$$



Obr. 4.15 První část přechodové charakteristiky třetího experimentu

Tab. 4.3 Srovnání výsledků metod aproximace naměřených dat při první polovině třetího experimentu

Metoda	Obrazový přenos	Přiléhavost
M3	$G(s) = \frac{328,090}{2,436 \cdot s + 1} e^{-0,689s}$	614,326
M5	$G(s) = \frac{328,090}{2,507 \cdot s + 1} e^{-0,635s}$	693
M7	$G(s) = \frac{328,090}{(2,206 \cdot s + 1) \cdot (0,647 \cdot s + 1)} e^{-0,200s}$	383,793



Obr. 4.16 Srovnání všech výsledných aproximací první části třetího experimentu s původní přechodovou charakteristikou

4.3.2 Druhá část třetího experimentu

Ustálená hodnota výstupu byla stanovena z naměřených hodnot a zesílení k_1 bylo vypočteno podle známého vztahu (4).

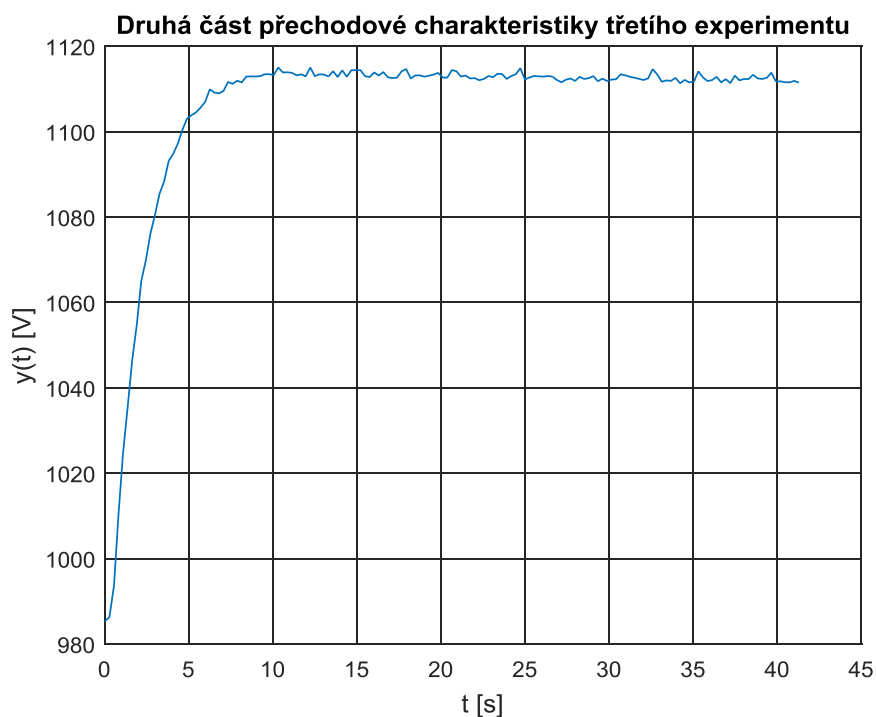
$$u(\infty) = 5 \text{ V}$$

$$u(0) = 3 \text{ V}$$

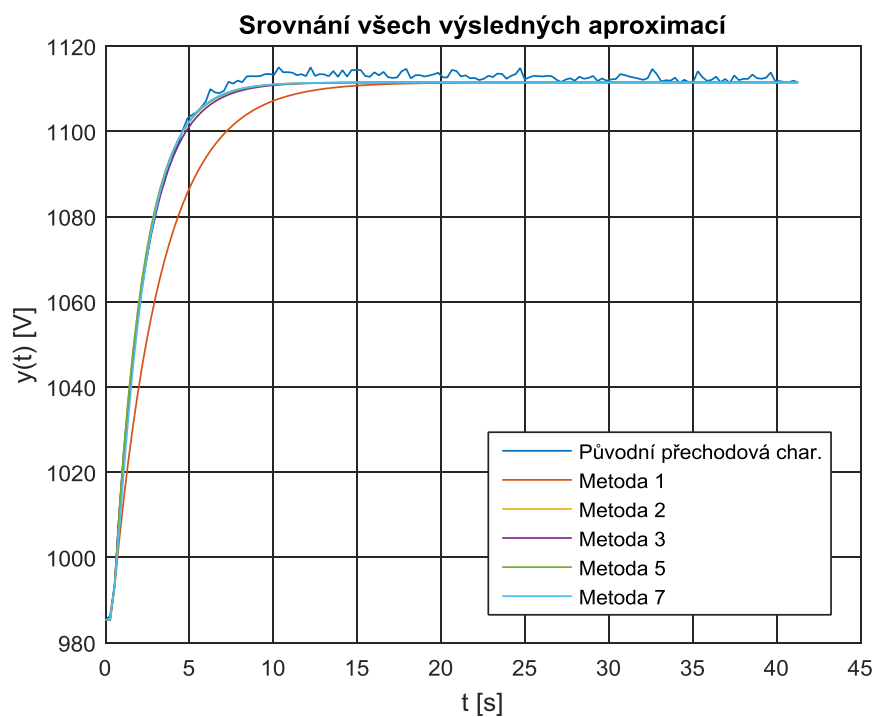
$$y(\infty) = 1111,500 \text{ V}$$

$$y(0) = 984,270 \text{ V}$$

$$k_1 = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)} = \frac{1111,500 - 984,270}{5 - 3} = 63,615$$

**Obr. 4.17 Druhá část přechodové charakteristiky třetího experimentu****Tab. 4.4 Srovnání výsledků metod aproximace naměřených dat při druhé polovině třetího experimentu**

Metoda	Obrazový přenos	Přiléhavost
M1	$G(s) = \frac{63,615}{2,840 \cdot s + 1} e^{-0,355s}$	666,119
M2	$G(s) = \frac{63,615}{1,734 \cdot s + 1} e^{-0,428s}$	213,733
M3	$G(s) = \frac{63,615}{1,818 \cdot s + 1} e^{-0,413s}$	218,430
M5	$G(s) = \frac{63,615}{1,733 \cdot s + 1} e^{-0,429s}$	213,749
M7	$G(s) = \frac{63,615}{(1,666 \cdot s + 1) \cdot (0,322 \cdot s + 1)} e^{-0,225s}$	215,693



Obr. 4.18 Srovnání všech výsledných aproximací druhé části třetího experimentu s původní přechodovou charakteristikou

4.4 Čtvrtý experiment

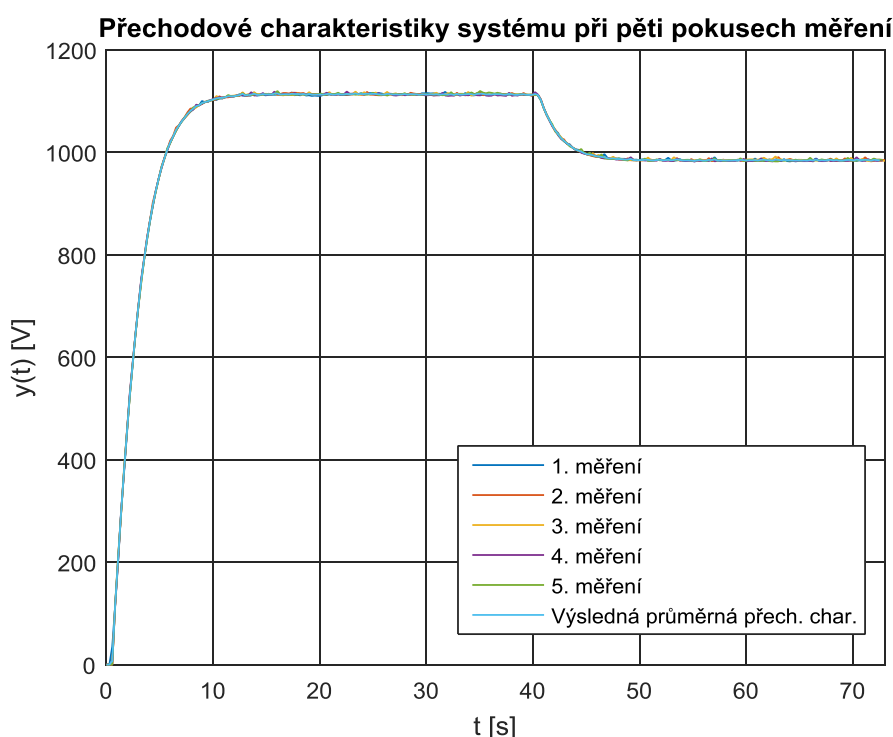
Počáteční podmínky se od prvního a druhého experimentu znatelně lišily, a to především v tom že počáteční hodnota napětí nebyla nulová. V čase 40 s došlo k poklesu akční veličiny z 5 V na hodnotu 3 V. Šířka časového okna byla 80 s.

Počáteční hodnota – 5 V

Velikost skoku akční veličiny – 4 V

Čas skoku – 40 s

Šířka časového okna – 80 s



Obr. 4.19 Přechodové charakteristiky pěti měření ve srovnání s průměrnou přechodovou charakteristikou za podmínek čtvrtého experimentu

Vstupní veličina byla skokově změněna v čase 40 sekund, a z toho důvodu bylo potřeba přechodovou charakteristiku rozdělit na dvě části.

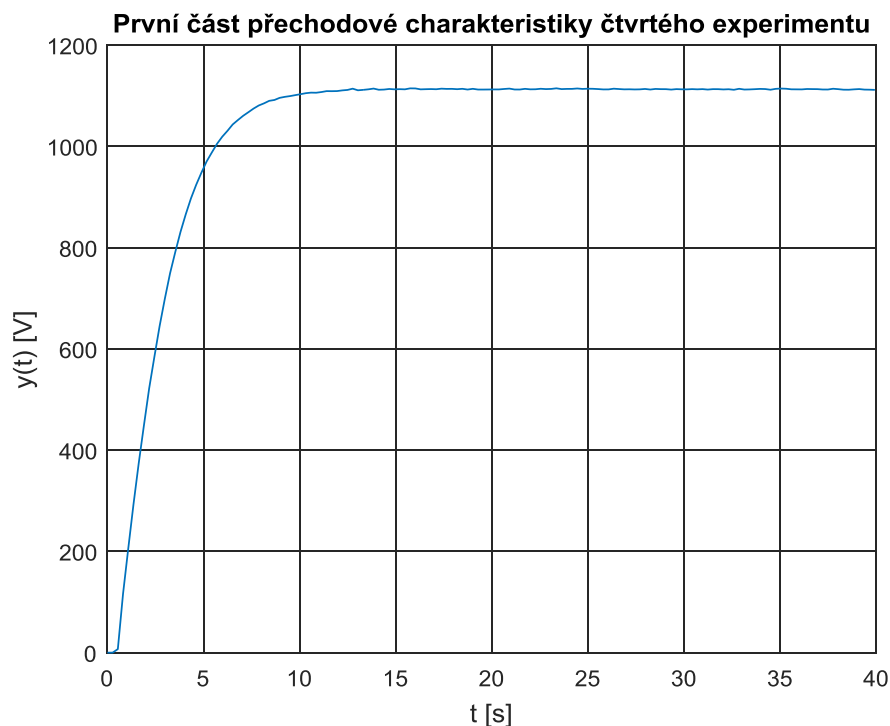
4.4.1 První část čtvrtého experimentu

Ustálená hodnota výstupu byla stanovena z naměřených hodnot a zesílení k_I bylo vypočteno podle známého vztahu (4).

$$u(\infty) = 5 \text{ V}$$

$$y(\infty) = 1111,600 \text{ V}$$

$$k_1 = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)} = \frac{1111,600 - 0}{5 - 0} = 222,326$$

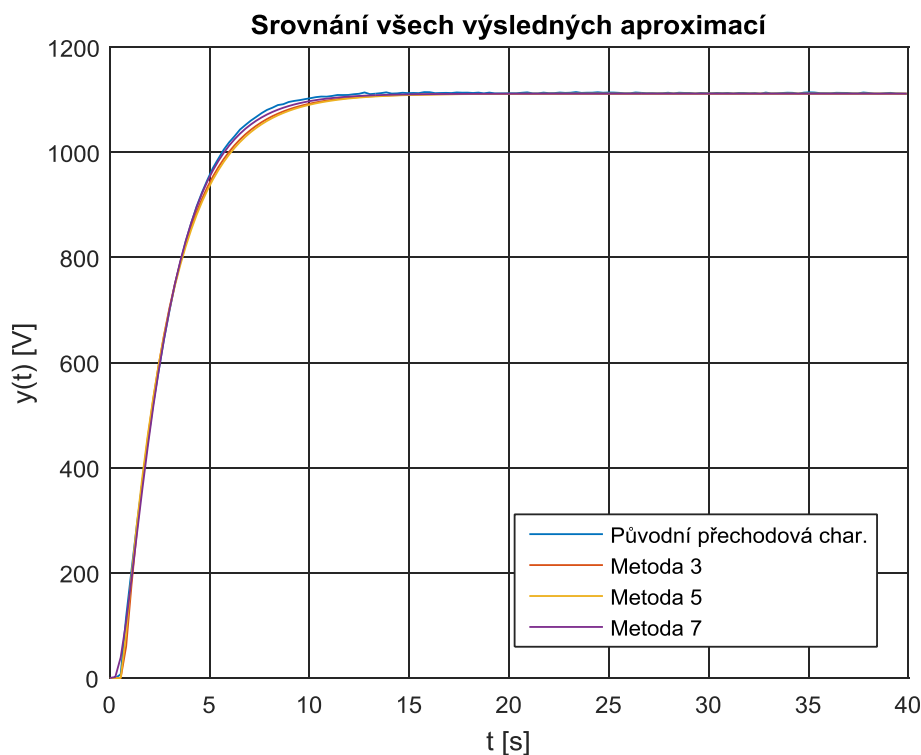


Obr. 4.20 První část přechodové charakteristiky čtvrtého experimentu

V dalším průběhu experimentu se postupovalo identicky jako v předchozím. A proto jsou dále popsány postupy aproximací jen u těch metod, u kterých nastala komplikace.

Tab. 4.5 Srovnání výsledků metod aproximace naměřených dat při první polovině čtvrtého experimentu

Metoda	Obrazový přenos	Přiléhavost
M3	$G(s) = \frac{222,326}{2,292 \cdot s + 1} e^{-0,689s}$	748,869
M5	$G(s) = \frac{222,326}{2,365 \cdot s + 1} e^{-0,630s}$	840,570
M7	$G(s) = \frac{222,326}{(2,078 \cdot s + 1) \cdot (0,628 \cdot s + 1)} e^{-0,0203s}$	457,504



Obr. 4.21 Srovnání všech výsledných aproximací první části čtvrtého experimentu s původní přechodovou charakteristikou

4.4.2 Druhá část čtvrtého experimentu

Ustálená hodnota výstupu byla stanovena z naměřených hodnot a zesílení k_I bylo vypočteno podle známého vztahu (4).

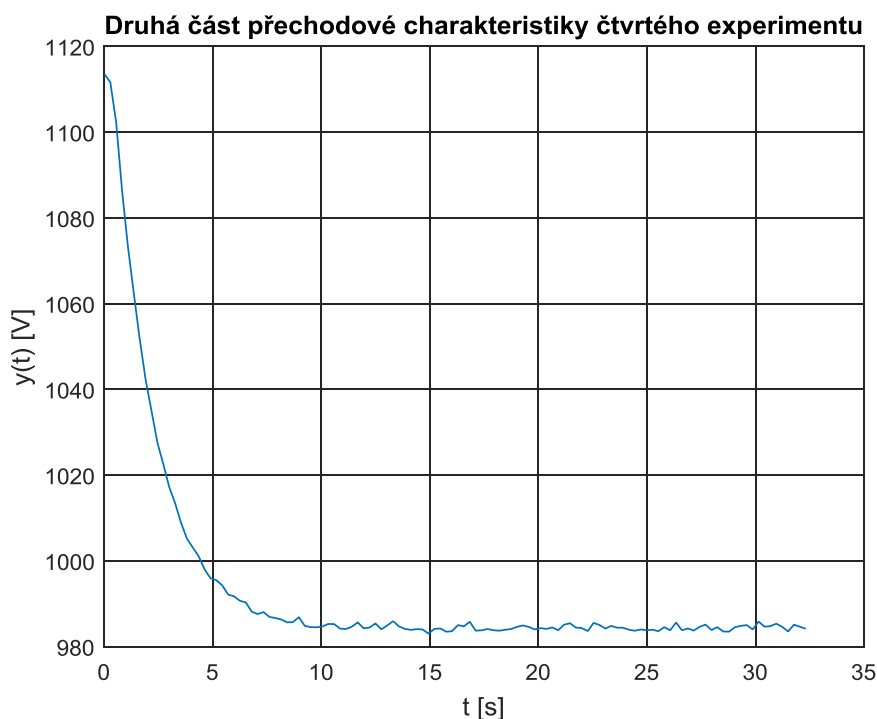
$$u(\infty) = 3 \text{ V}$$

$$u(0) = 5 \text{ V}$$

$$y(\infty) = 984,172 \text{ V}$$

$$y(0) = 1113,600 \text{ V}$$

$$k_1 = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)} = \frac{|984,172 - 1113,600|}{|3 - 5|} = 64,714$$

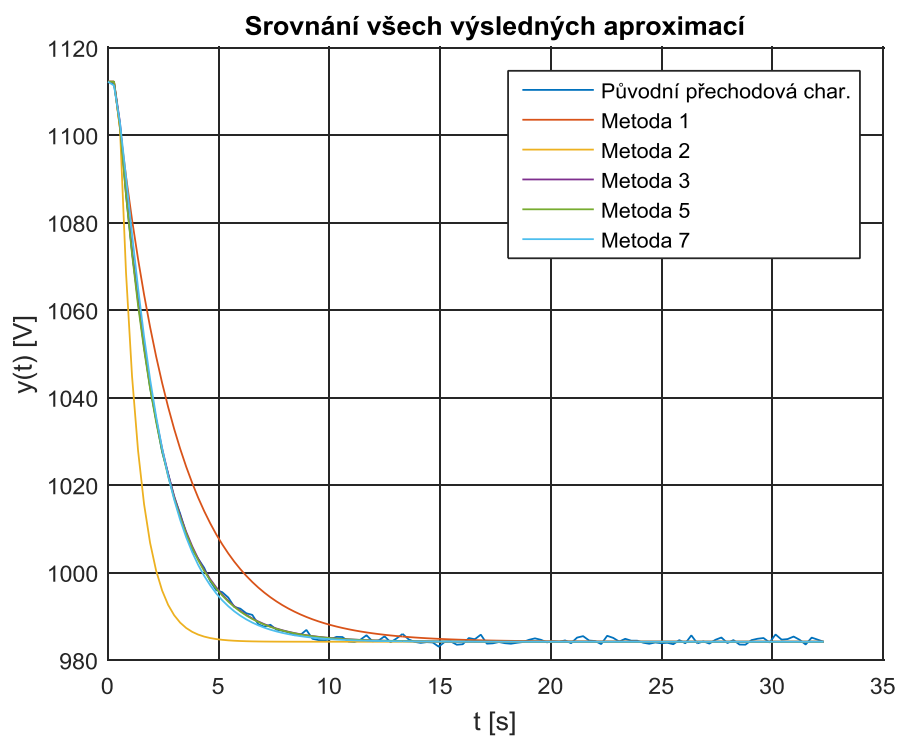


Obr. 4.22 Druhá část přechodové charakteristiky čtvrtého experimentu

V dalším průběhu experimentu se postupovalo identicky jako v předchozím. A proto jsou dále popsány postupy aproximací jen u těch metod, u kterých nastala komplikace.

Tab. 4.6 Srovnání výsledků metod aproximace naměřených dat při druhé polovině čtvrtého experimentu

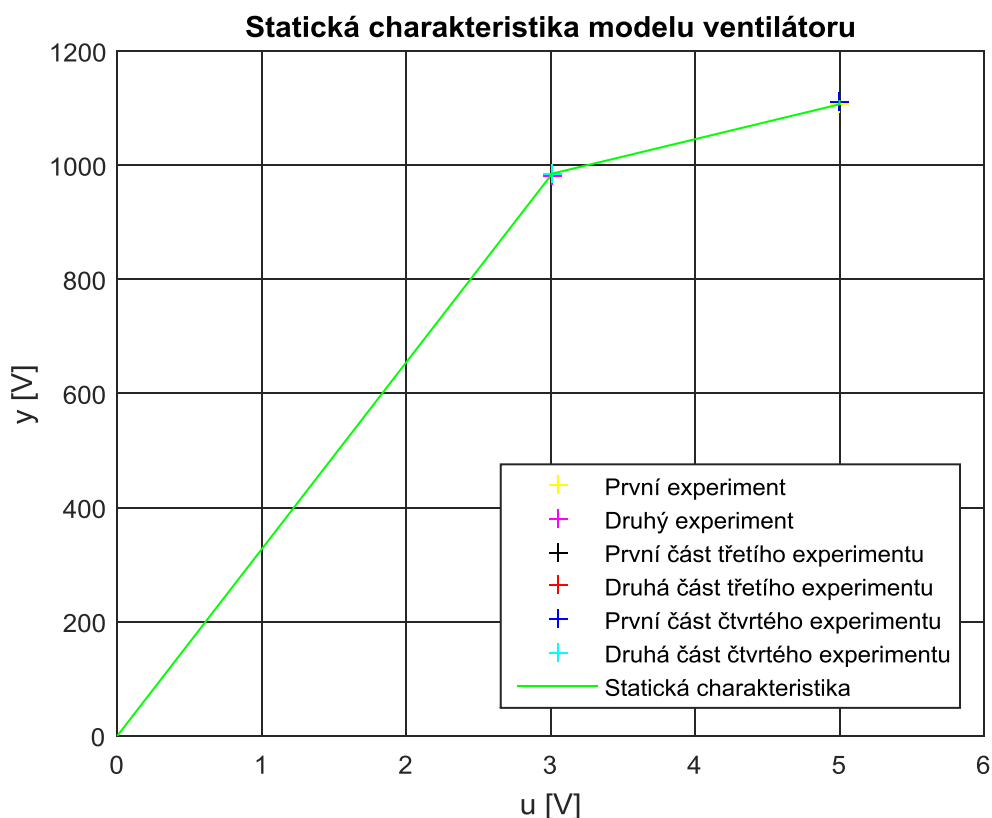
Metoda	Obrazový přenos	Přiléhavost
M1	$G(s) = \frac{64,017}{2,780 \cdot s + 1} e^{-0,301s}$	392,492
M2	$G(s) = \frac{64,017}{0,826 \cdot s + 1} e^{-0,471s}$	517,235
M3	$G(s) = \frac{64,017}{1,927 \cdot s + 1} e^{-0,397s}$	58,9436
M5	$G(s) = \frac{64,017}{1,917 \cdot s + 1} e^{-0,429s}$	59,668
M7	$G(s) = \frac{64,017}{(1,761 \cdot s + 1) \cdot (0,362 \cdot s + 1)} e^{-0,172s}$	84,090



Obr. 4.23 Srovnání všech výsledných aproximací druhé části čtvrtého experimentu s původní přechodovou charakteristikou

4.5 Statická charakteristika modelu

Pro vykreslení statické charakteristiky byla použita data všech čtyř experimentů. Jelikož se v průběhu měření třetího a čtvrtého experimentu změnila hodnota akční veličiny, byly jejich přechodové charakteristiky rozděleny na dvě části, z čehož plyne, že oba experimenty mají dvě hodnoty vstupu a dvě hodnoty výstupu, a proto mají dvě statické charakteristiky. První experiment měl velikost skoku akční veličiny $u_1(\infty) = 5 \text{ V}$ a ustálenou hodnotu výstupu $y_1(\infty) = 1106,300 \text{ V}$. Hodnota akční veličiny druhého experimentu byla $u_2(\infty) = 3 \text{ V}$ a jeho ustálená hodnota výstupu byla $y_2(\infty) = 982,097 \text{ V}$. První část třetího experimentu měla akční veličinu $u_{31}(\infty) = 3 \text{ V}$ a ustálenou hodnotu výstupu $y_{31}(\infty) = 985,324 \text{ V}$. Hodnoty druhé části experimentu byly $u_{32}(\infty) = 5 \text{ V}$ a $y_{32}(\infty) = 1111,500 \text{ V}$. První část čtvrtého experimentu měla akční veličinu $u_{41}(\infty) = 5 \text{ V}$ a ustálenou hodnotu výstupu $y_{41}(\infty) = 1111,600 \text{ V}$. Hodnoty druhé části experimentu byly $u_{42}(\infty) = 3 \text{ V}$ a $y_{42}(\infty) = 984,172 \text{ V}$.



Obr. 4.24 Statická charakteristika laboratorního modelu ventilátoru

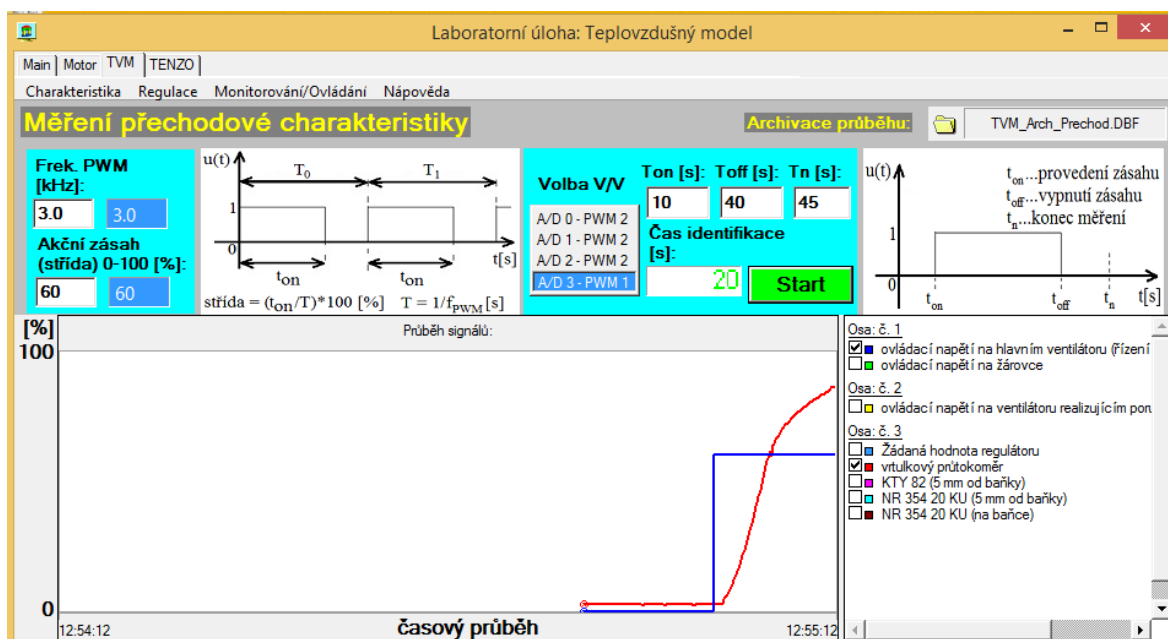
5 Zpracování naměřených dat teplovzdušného modelu

Celé měření se skládalo ze tří experimentů, ale z důvodu časové tísně byly identifikovány jenom první dva. Aby bylo dosaženo dostatečně přesných výsledků, bylo při každém provedeno pět měření a z nich byla vytvořena průměrná hodnota.



Obr. 5.1 Detailní pohled na miniaturizovaný inovovaný modul elektroniky 2004 [www.352.vsb.cz]

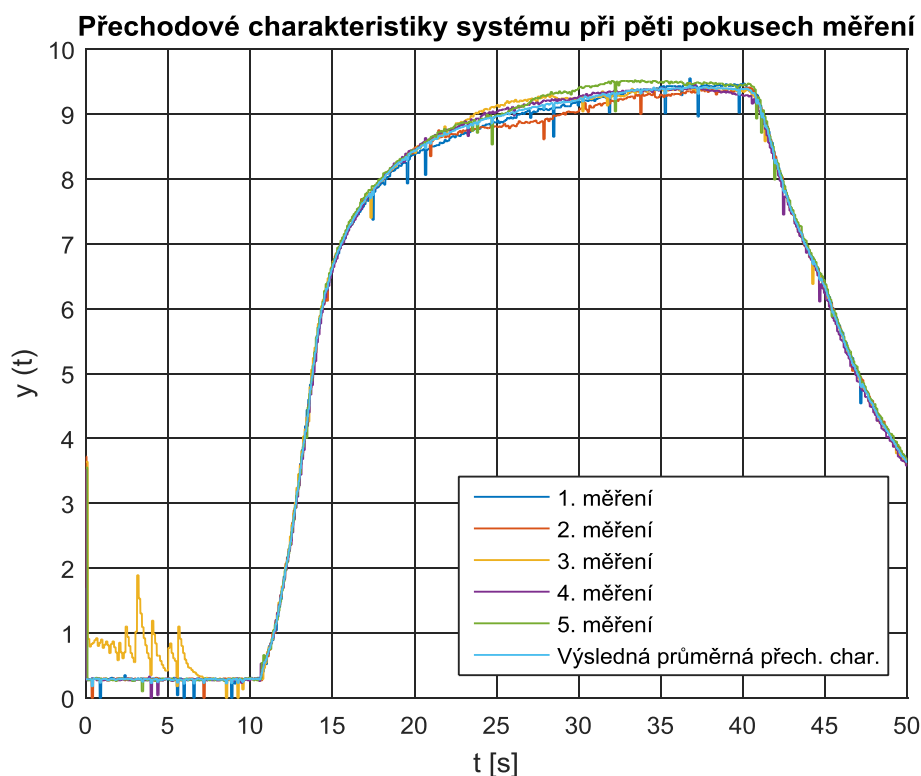
K ovládání modelu a měření přechodových charakteristik byl použit program TVM v laboratoři H303.



Obr. 5.2 Software použitý k ovládání modelu a měření přechodových charakteristik

5.1 První experiment

Z grafu přechodové charakteristiky je zřejmé, že ke skokové změně došlo v čase $T_{on} = 10 \text{ s}$ při vzorkovací frekvenci $f = 0,1 \text{ kHz}$, konec působení vstupní veličiny nastal v čase $T_{off} = 40 \text{ s}$ a celé měření bylo ukončeno v čase $T_N = 50 \text{ s}$. Akční zásah byl $u(\infty) = 50 \%$.



Obr. 5.3 Přechodové charakteristiky pěti měření ve srovnání s průměrnou přechodovou charakteristikou za podmínek prvního experimentu

Vstupní veličina byla skokově změněna v čase 10 s , a z toho důvodu byla přechodová charakteristika zkrácena o tuto hodnotu. Zároveň přestal být systém v čase 40 s aktivní, a proto byla přechodová charakteristika v tomto čase ukončena.

5.1.1 Aproximace pomocí tečny/sečny v inflexním bodě

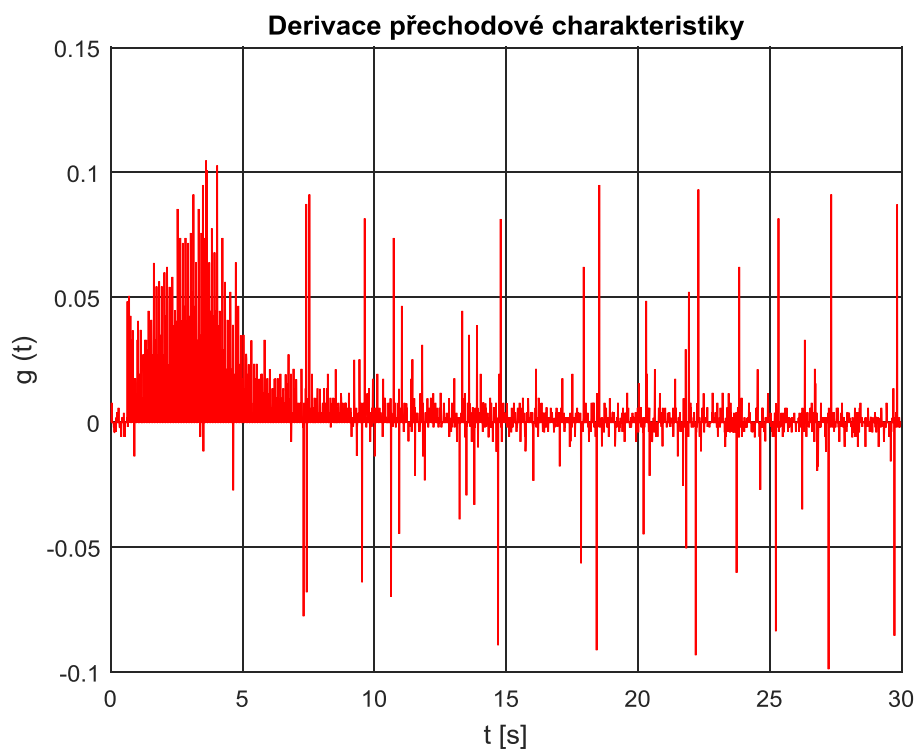
Ustálená hodnota výstupu byla stanovena z naměřených hodnot a zesílení k_l bylo vypočteno podle známého vztahu (4).

$$u(\infty) = 50 \% = 5 \text{ V}$$

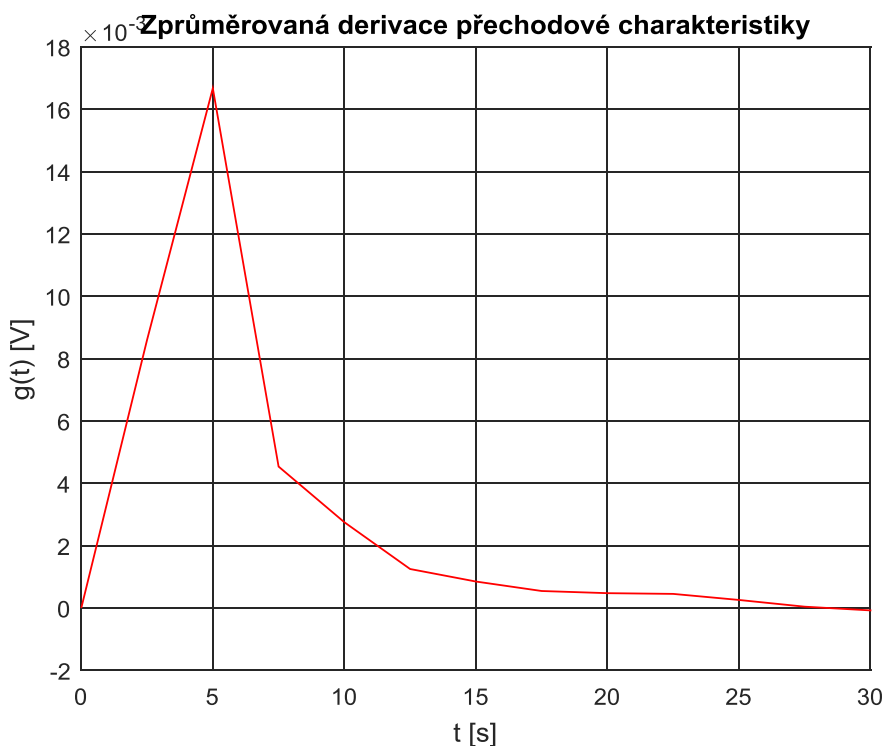
$$y(\infty) = 9,384 \text{ V}$$

$$k_1 = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)} = \frac{9,384 - 0,291}{5 - 0} = 1,819$$

Z derivace přechodové charakteristiky (Obr. 5.4) nebylo průkazné, zda má funkce inflexní bod, proto byla derivace zprůměrována. Takto zprůměrovaná byla převedena do grafu (viz. obr. 5.16), ze kterého lze usoudit, že v tomto případě funkce inflexním bodem nemá.



Obr. 5.4 Derivace přechodové charakteristiky prvního experimentu



Obr. 5.5 Průměrná hodnota derivace přechodové charakteristiky

5.1.2 Aproximace dvoubodovou metodou [Varianta č. 1]

Byly stanoveny hodnoty 70 procent a 33 procent ustálené hodnoty výstupní veličiny $y(\infty)$ a jim odpovídající časové okamžiky

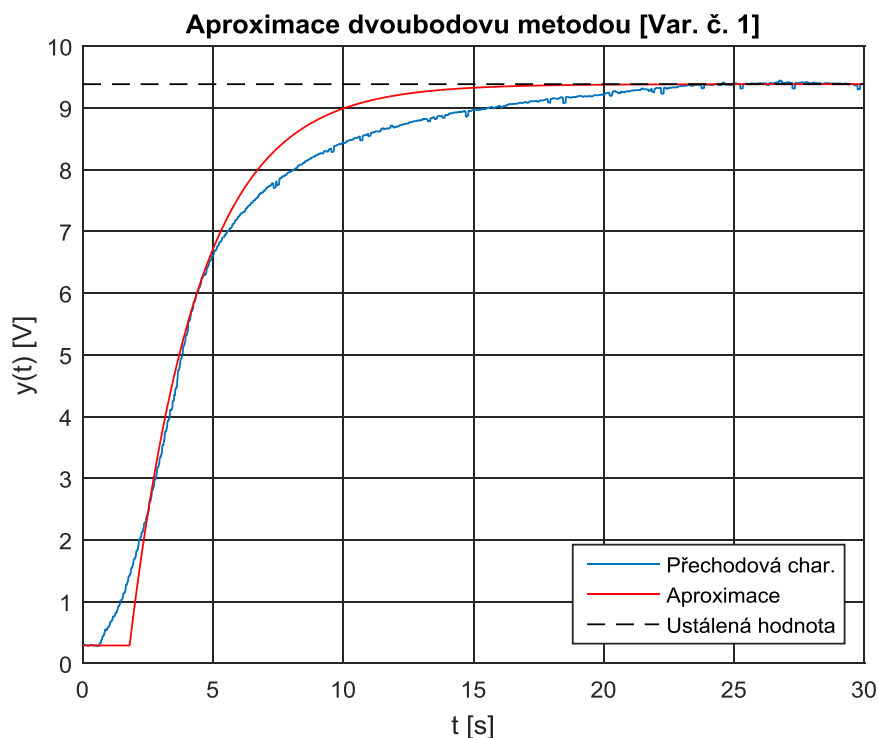
$$y_{0,70} = 6,569 \rightarrow t_{0,70} = 4,934$$

$$y_{0,33} = 3,097 \rightarrow t_{0,33} = 2,835$$

Z hodnot obou časových okamžiků byly vypočteny parametry přenosu:

$$T_d = 1,498 \cdot t_{0,33} - 0,498 \cdot t_{0,7} = 1,498 \cdot 2,835 - 0,498 \cdot 4,934 = 1,789 \text{ s}$$

$$T_1 = 1,245 \cdot (t_{0,7} - t_{0,33}) = 1,245 \cdot (4,934 - 2,835) = 2,614 \text{ s}$$



Obr. 5.6 Vykreslení aproximace variantou č. 1 dvoubodové metody

Z dosažených výsledků byl definován přenos:

$$G(s) = \frac{1,819}{2,614 \cdot s + 1} e^{-1,789 \cdot s}$$

Poté byla vypočtena přiléhavost S_e podle vzorce (24).

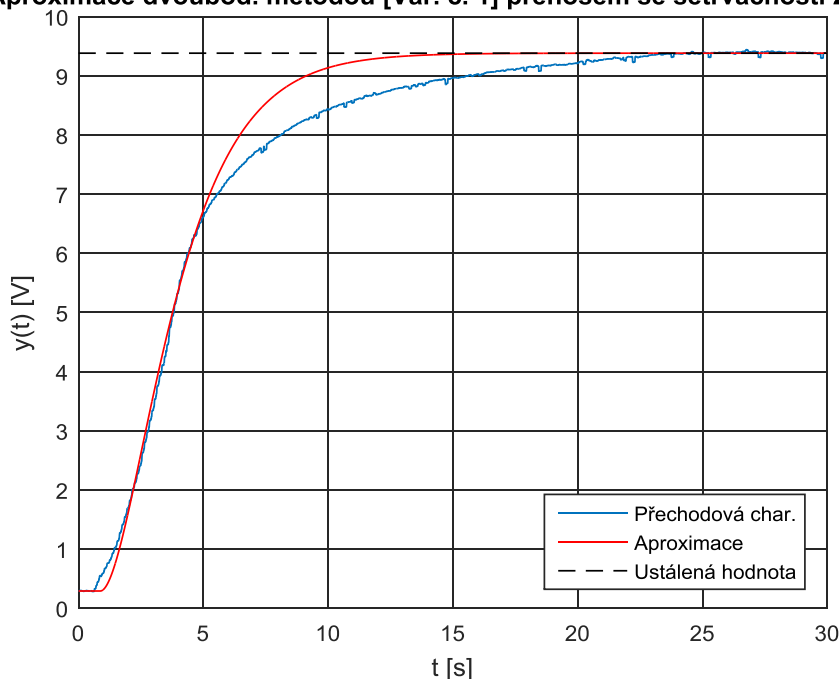
$$S_e = 771,538$$

Dále byl převeden na přenos se setrvačností 2. řádu podle vzorce (13).

$$T_2 = 0,638 \cdot T_1 = 0,638 \cdot 2,614 = 1,668$$

$$T_{d2} = T_d - 0,352 \cdot T_1 = 1,789 - 0,352 \cdot 2,614 = 0,869$$

Aproximace dvoubod. metodou [Var. č. 1] přenosem se setrvačností 2. řádu



Obr. 5.7 Vykreslení aproximace variantou č. 1 dvoubodové metody přenosem se setrvačností 2. řádu

Z dosažených výsledků byl definován přenos

$$G(s) = \frac{1,819}{(1,668 \cdot s + 1)^2} e^{-0,869 \cdot s}$$

Poté byla vypočtena přiléhavost S_e podle vzorce (24).

$$S_e = 825,645$$

5.1.3 Aproximace dvoubodovou metodou [Varianta č. 2]

Byly stanoveny hodnoty 28 a 63 procent výstupní veličiny $y(\infty)$ a jim odpovídající časové okamžiky:

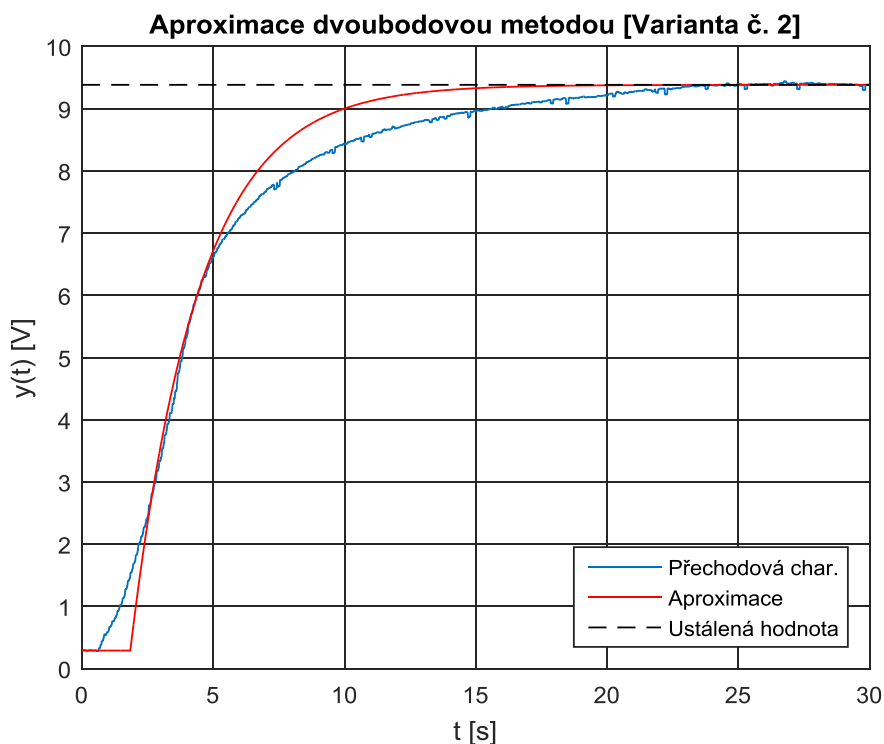
$$y_{0,63} = 6,020 \rightarrow t_{0,63} = 4,413$$

$$y_{0,28} = 2,837 \rightarrow t_{0,28} = 2,696$$

Z hodnot obou časových okamžiků byly vypočteny parametry přenosu:

$$T_d = 1,5 \cdot \left(t_{0,28} - \frac{1}{3} \cdot t_{0,63} \right) = 1,5 \cdot \left(2,696 - \frac{1}{3} \cdot 4,413 \right) = 1,838 \text{ s}$$

$$T_1 = 1,5 \cdot (t_{0,63} - t_{0,28}) = 1,5 \cdot (4,413 - 2,696) = 2,574 \text{ s}$$



Obr. 5.8 Vykreslení aproximace variantou č. 2 dvoubodové metody

Z dosažených výsledků byl definován přenos:

$$G(s) = \frac{1,819}{2,574 \cdot s + 1} e^{-1,838 \cdot s}$$

Poté byla vypočtena přiléhavost S_e podle vzorce (24).

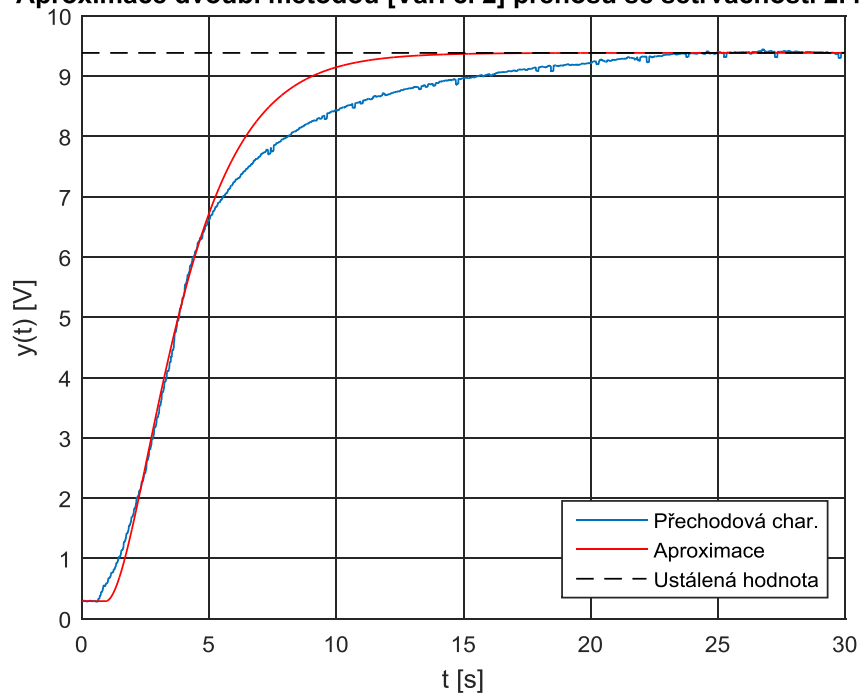
$$S_e = 783,815$$

Dále byl převeden na přenos se setrvačností 2. řádu podle vzorce (13).

$$T_2 = 0,638 \cdot T_1 = 0,638 \cdot 2,574 = 1,643 \text{ s}$$

$$T_{d2} = T_d - 0,352 \cdot T_1 = 1,838 - 0,352 \cdot 2,574 = 0,932 \text{ s}$$

Aproximace dvoub. metodou [Var. č. 2] přenosu se setrvačností 2. řádu



Obr. 5.9 Vykreslení aproximace variantou č. 2 dvoubodové metody přenosem se setrvačností 2. řádu

Z dosažených výsledků byl definován přenos

$$G(s) = \frac{1,819}{(1,643 \cdot s + 1)^2} e^{-0,932 \cdot s}$$

Poté byla vypočtena přiléhavost S_e podle vzorce (24).

$$S_e = 834,991$$

5.1.4 Aproximace třibodovou metodou

Byly stanoveny hodnoty 9, 26 a 70 procent ustálené hodnoty výstupní veličiny $y(\infty)$ a jim odpovídající časové okamžiky

$$y_{0,09} = 1,110 \rightarrow t_{0,09} = 1,541$$

$$y_{0,26} = 2,655 \rightarrow t_{0,26} = 2,598$$

$$y_{0,70} = 6,656 \rightarrow t_{0,70} = 5,036$$

Následně byla vypočtena časová konstanta dopravního zpoždění

$$T_d = 2 \cdot t_{0,09} - t_{0,26} = 2 \cdot 1,541 - 2,598 = 0,484$$

Výpočet koeficientů B a C :

$$B = 0,83 \cdot t_{0,7} - 0,24 \cdot t_{0,26} + 0,48 \cdot t_{0,09} - T_d$$

$$B = 0,83 \cdot 5,036 - 0,24 \cdot 2,598 + 0,48 \cdot 1,541 - 0,484 = 3,812$$

$$C = 4 \cdot (t_{0,26} - t_{0,09})^2$$

$$C = 4 \cdot (2,598 - 1,541)^2 = 4,472$$

Výpočet časových konstant T_1 a T_2 :

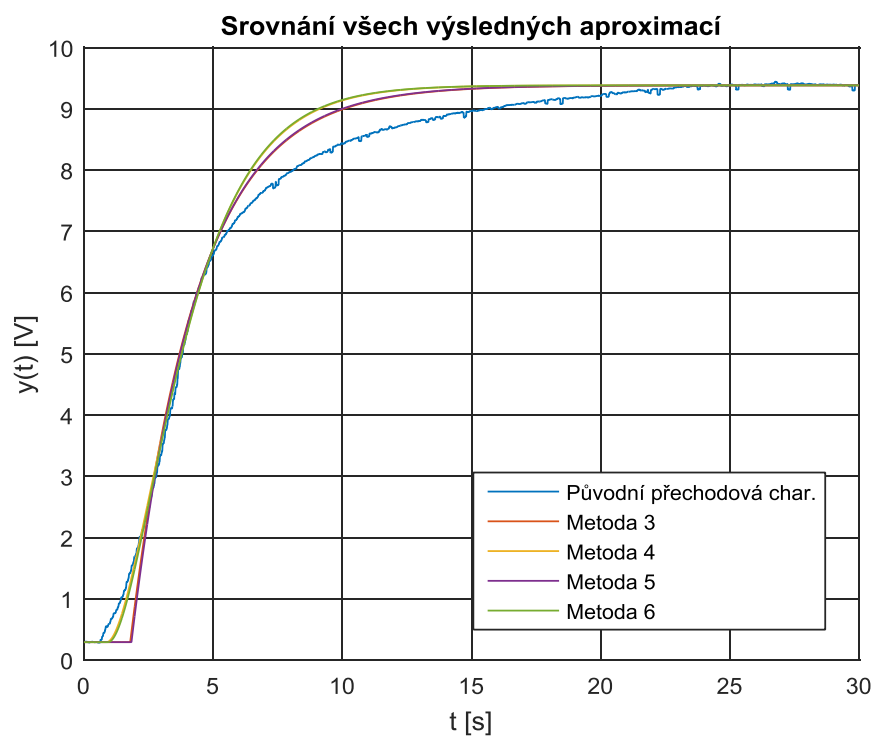
$$T_1 = \frac{B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot C}}{2} = \frac{3,812 + \sqrt{3,812^2 - 4 \cdot 4,472}}{2}$$

$$T_2 = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot C}}{2} = \frac{3,812 - \sqrt{3,812^2 - 4 \cdot 4,472}}{2}$$

Ve výpočtu časových konstant se objevila odmocnina záporné hodnoty, a proto aproximaci touto metodou nebylo možné dále řešit.

Tab. 5.1 Srovnání výsledků metod aproximace dat prvního experimentu

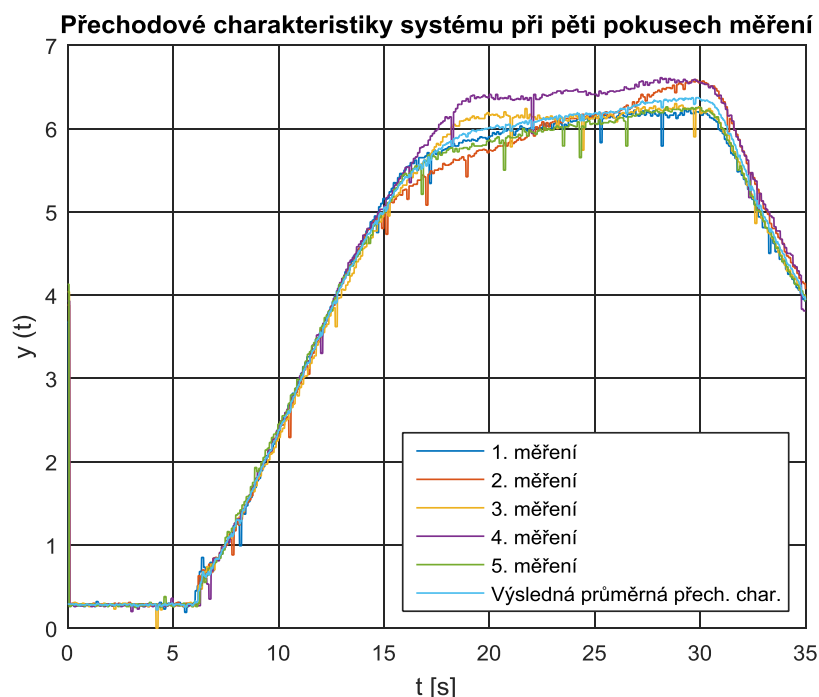
Metoda	Obrazový přenos	Přiléhavost
M3	$G(s) = \frac{1,819}{2,614 \cdot s + 1} e^{-1,789 \cdot s}$	771,538
M4	$G(s) = \frac{1,819}{(1,668 \cdot s + 1)^2} e^{-0,869 \cdot s}$	825,645
M5	$G(s) = \frac{1,819}{2,574 \cdot s + 1} e^{-1,838 \cdot s}$	783,815
M6	$G(s) = \frac{1,819}{(1,643 \cdot s + 1)^2} e^{-0,932 \cdot s}$	834,991



Obr. 5.10 Srovnání všech výsledných aproximací s původní přechodovou charakteristikou

5.2 Druhý experiment

Z grafu přechodové charakteristiky je zřejmé, že ke skokové změně došlo v čase $T_{on} = 5 \text{ s}$ při vzorkovací frekvenci $f = 0,1 \text{ kHz}$, konec působení vstupní veličiny nastal v čase $T_{off} = 30 \text{ s}$ a celé měření bylo ukončeno v čase $T_N = 35 \text{ s}$. Akční zásah byl $u(\infty) = 40 \%$.



Obr. 5.11 Přechodové charakteristiky pěti měření ve srovnání s průměrnou přechodovou charakteristikou za podmínek druhého experimentu

Ustálená hodnota výstupu byla stanovena z naměřených hodnot a zesílení k_I bylo vypočteno podle známého vztahu (4).

$$u(\infty) = 40 \% = 4 \text{ V}$$

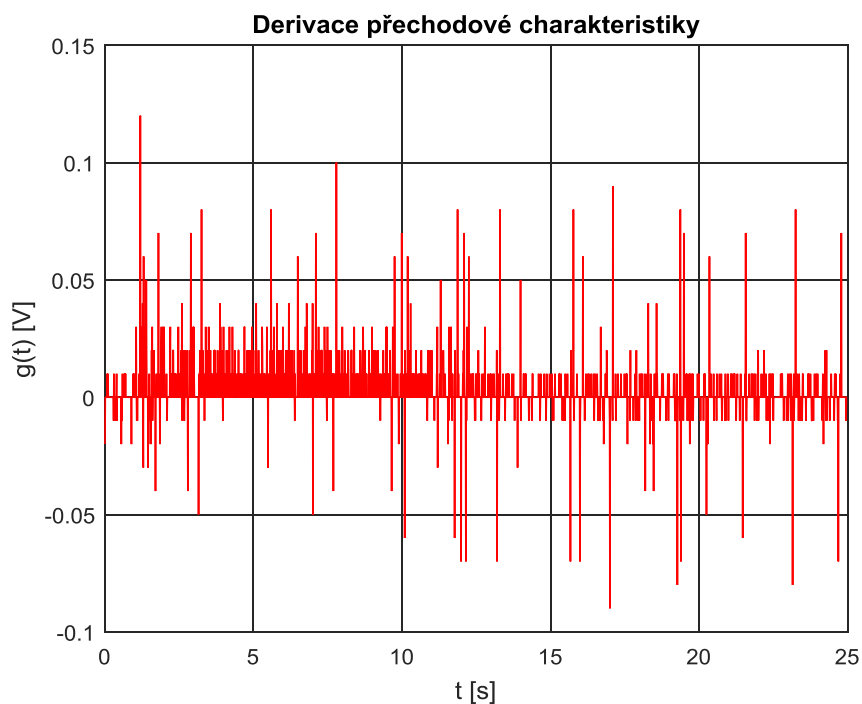
$$y(\infty) = 6,360 \text{ V}$$

$$k_I = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y(\infty) - y(0)}{u(\infty) - u(0)} = \frac{6,360 - 0,290}{4 - 0} = 1,518$$

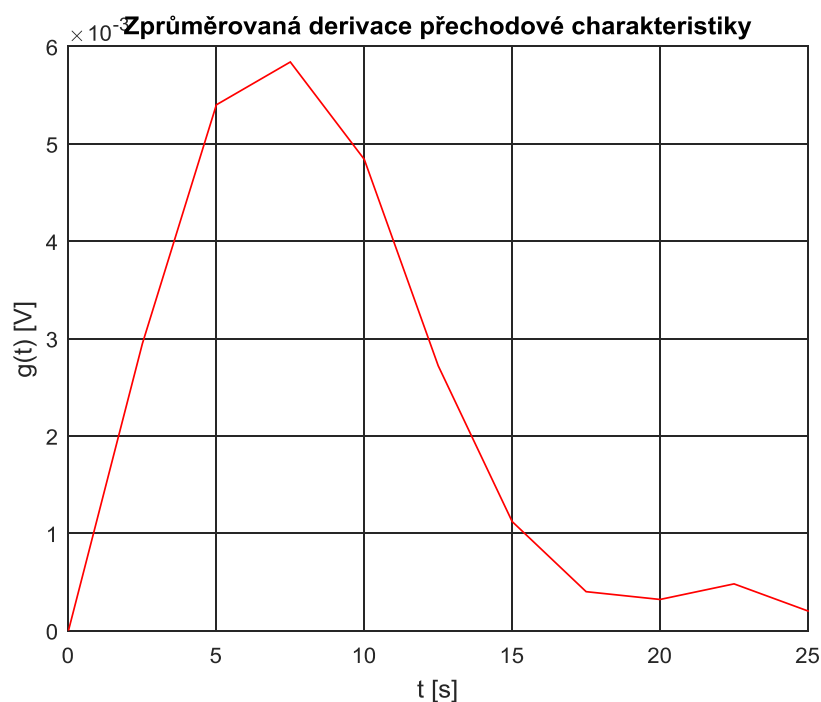
V rámci druhého experimentu se postupovalo identicky jako v předchozím. Z toho důvodu jsou v dalším průběhu popsány postupy aproximací jen u těch metod, u kterých nastala komplikace.

5.2.1 Aproximace pomocí tečny/sečny v inflexním bodě

Z derivace přechodové charakteristiky (viz. obr. 5.12) nebylo průkazné, zda má funkce inflexní bod, proto byla derivace zprůměrována. Takto zprůměrovaná byla převedena do grafu (viz. obr. 5.13), ze kterého lze usoudit, že v tomto případě funkce inflexním bodem nemá.



Obr. 5.12 Derivace přechodové charakteristiky prvního experimentu



Obr. 5.13 Průměrná hodnota derivace přechodové charakteristiky

5.2.2 Aproximace třibodovou metodou

Byly stanoveny hodnoty 9, 26 a 70 procent ustálené hodnoty výstupní veličiny $y(\infty)$ a jim odpovídající časové okamžiky

$$y_{0,09} = 0,836 \rightarrow t_{0,09} = 2,076$$

$$y_{0,26} = 1,868 \rightarrow t_{0,26} = 4,082$$

$$y_{0,70} = 4,539 \rightarrow t_{0,70} = 8,879$$

Následně byla vypočtena časová konstanta dopravního zpoždění

$$T_d = 2 \cdot t_{0,09} - t_{0,26} = 2 \cdot 2,076 - 4,082 = 0,044 \text{ s}$$

Výpočet koeficientů B a C :

$$B = 0,83 \cdot t_{0,7} - 0,24 \cdot t_{0,26} + 0,48 \cdot t_{0,09} - T_d$$

$$B = 0,83 \cdot 4,539 - 0,24 \cdot 4,082 + 0,48 \cdot 2,076 - 0,044 = 7,336$$

$$C = 4 \cdot (t_{0,26} - t_{0,09})^2$$

$$C = 4 \cdot (4,082 - 2,076)^2 = 16,515$$

Výpočet časových konstant T_1 a T_2 :

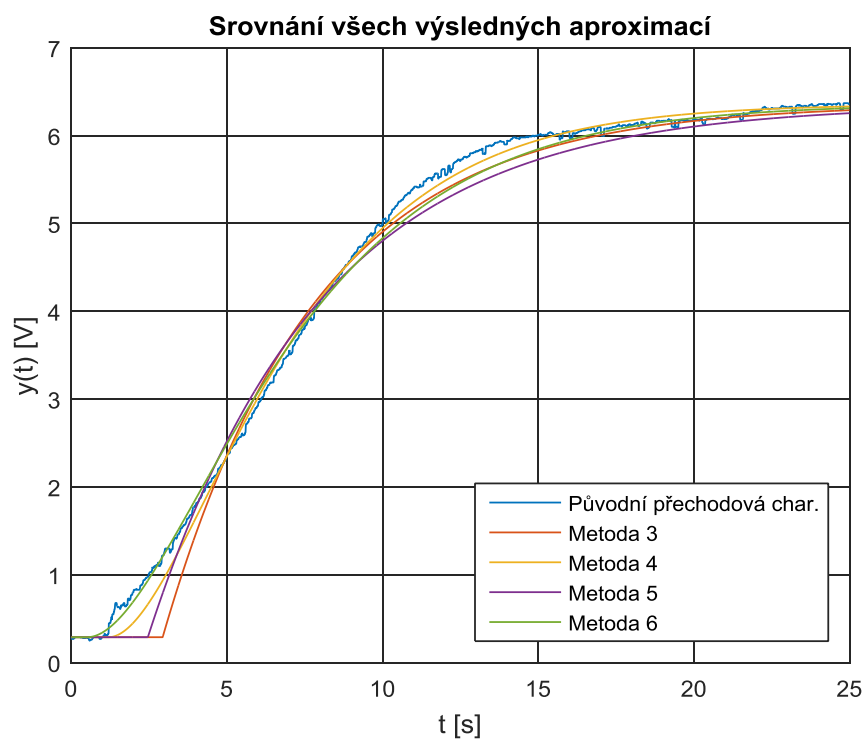
$$T_1 = \frac{B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot C}}{2} = \frac{7,336 + \sqrt{7,336^2 - 4 \cdot 16,515}}{2}$$

$$T_2 = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4 \cdot C}}{2} = \frac{7,336 - \sqrt{7,336^2 - 4 \cdot 16,515}}{2}$$

Ve výpočtu časových konstant se objevila odmocnina záporné hodnoty, a proto aproximaci touto metodou nebylo možné dále řešit.

Tab. 5.2 Srovnání výsledků metod aproximace dat druhého experimentu

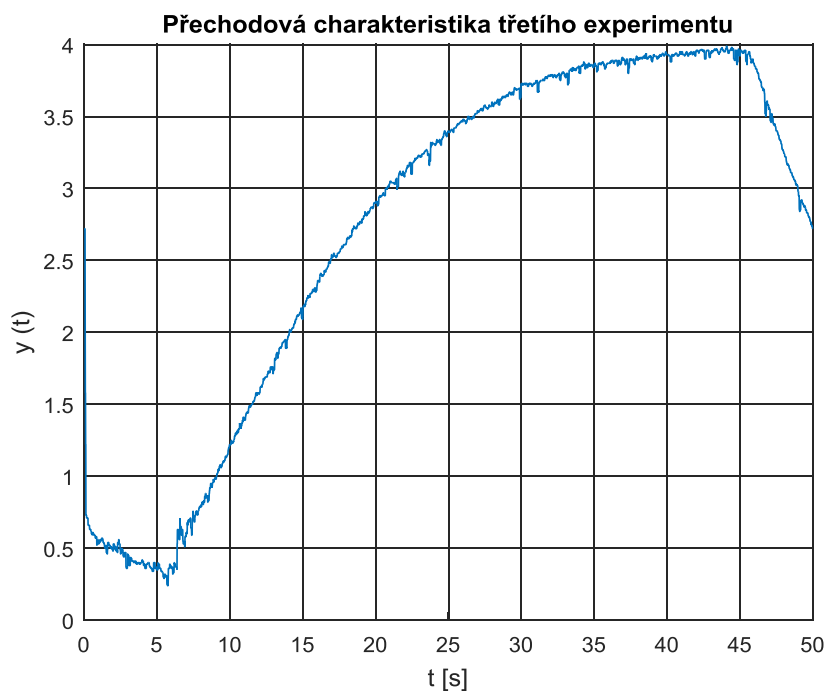
Metoda	Obrazový přenos	Přiléhavost
M3	$G(s) = \frac{1,518}{4,946 \cdot s + 1} e^{-2,928 \cdot s}$	387,539
M4	$G(s) = \frac{1,518}{(3,155 \cdot s + 1)^2} e^{-1,188 \cdot s}$	214,121
M5	$G(s) = \frac{1,518}{5,542 \cdot s + 1} e^{-2,453 \cdot s}$	464,353
M6	$G(s) = \frac{1,518}{(3,536 \cdot s + 1)^2} e^{-0,502 \cdot s}$	248,904



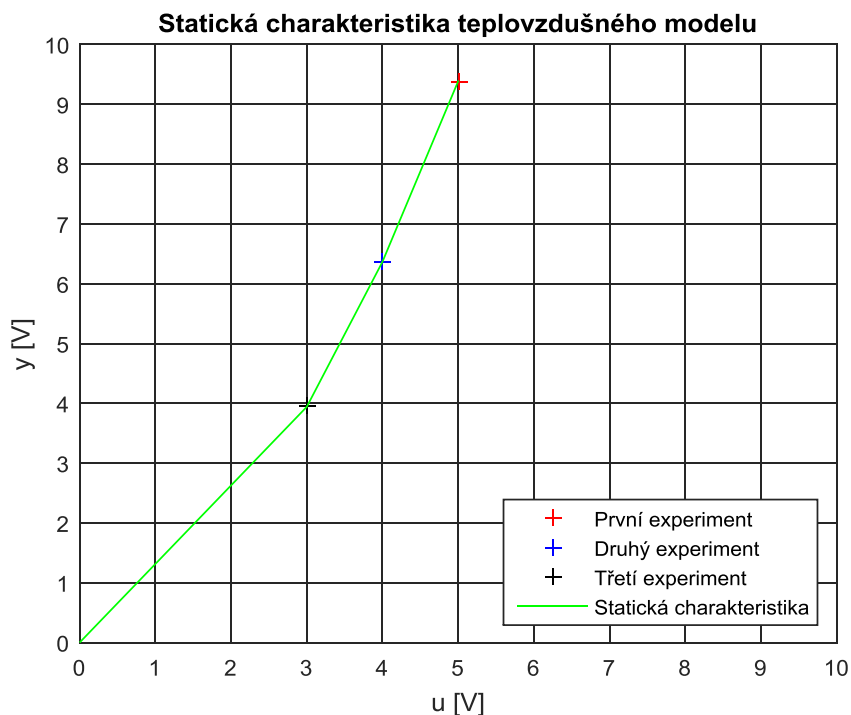
Obr. 5.14 Srovnání všech výsledných aproximací s původní přechodovou charakteristikou

5.3 Statická charakteristika modelu

První experiment měl velikost skoku akční veličiny $u_1(\infty) = 5 \text{ V}$ a ustálenou hodnotu výstupu $y_1(\infty) = 9,385 \text{ V}$. Hodnota akční veličiny druhého experimentu byla $u_2(\infty) = 4 \text{ V}$ a jeho ustálená hodnota výstupu byla $y_2(\infty) = 6,366 \text{ V}$. Třetí experiment měl akční veličinu $u_3(\infty) = 3 \text{ V}$ a ustálenou hodnotu výstupu $y_{3I}(\infty) = 3,941 \text{ V}$.



Obr. 5.15 Přechodová charakteristika třetího experimentu



Obr. 5.16 Statická charakteristika teplovzdušného modelu

6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo seznámit se s metodami experimentální identifikace přechodových charakteristik proporcionálních systémů a použít je pro určení dynamických vlastností reálných modelů. Úvod práce obsahuje detailní popis vybraných metod a postup výpočtu je demonstrován na vygenerovaných datech. Z výsledné tabulky srovnání jednotlivých metod aproximace (viz tab. 3.1) je zřejmé, že nejpřesnější byla třibodová metoda, která měla oproti ostatním odchylku prakticky zanedbatelnou.

Dalším krokem bylo určit matematický popis laboratorního modelu ventilátoru. Měření přechodových charakteristik bylo provedeno v programu Fan Control 3.1 a byly provedeny čtyři experimenty za odlišných podmínek.

Z výsledných tabulek je zřejmé, že metody tečny a sečny nejsou pro model ventilátoru vhodné. Jejich realizaci u většiny experimentů zabránilo to, že funkce měly inflexní bod na časové ose, což je nepřipustné. Tyto dvě metody se podařilo realizovat jen u dvou ze šesti experimentů a dá se to brát jenom jako náhoda. Z dosažených výsledků se dá usoudit, že se jedná o systém se setrvačností 1. řádu, což bylo potvrzeno i nemožností převést obě dvoubodové metody na přenos se setrvačností 2. řádu. To se nezdařilo ani u jednoho experimentu a příčinou byla záporná hodnota převedeného dopravního zpoždění, což také není přípustné. Naopak dobrých výsledků dosáhla třibodová metoda, což je překvapivé vzhledem k tomu, že, jak už bylo zmíněno, je model pravděpodobně systémem se setrvačností 1. řádu. Tyto dobré výsledky mohly být zapříčiněny tím, že dopravní zpoždění u této metody v rámci modelu ventilátoru je pod rozlišovací úrovní, protože ve všech experimentech mělo velmi nízké hodnoty. Zároveň byla vytvořena statická charakteristika modelu za účelem zjištění linearitu systému. Z grafu jejího průběhu (viz. obr. 4.24) je zřejmé, že systém lineární není.

Konečné vyhodnocení tedy zní, že laboratorní model ventilátoru je nelineární systém se setrvačností 1. řádu.

Dalším krokem bylo určení matematického popisu změny teploty teplovzdušného modelu v laboratoři H309. Měření přechodových charakteristik bylo provedeno v programu TVM.

Z výsledných tabulek je zřejmé, že metody tečny a sečny nejsou vhodné ani pro teplovzdušný model. Tentokrát to bylo zapříčiněno nemožností definovat inflexní bod z derivace přechodové charakteristiky. Pro tento účel byla derivace zprůměrována, ale výchyly byly tak nepatrné, že se nedalo jednoznačně inflexní body zjistit. Na tomto modelu nebylo možné realizovat ani třibodovou metodu, protože v obou experimentech se

při výpočtu časových konstant objevila záporná hodnota pod odmocninou, což mohl zavinit atipický průběh přechodové charakteristiky. Zároveň se u tohoto modelu podařilo převést oba přenosy se setrvačností 1. řádu obou dvoubodových metod na přenosy se setrvačností 2. řádu. I přes nezdar třibodové metody, který mohl být zapříčiněn chybou v průměrování, tento model vypadá na systém se setrvačností 2. řádu. I u tohoto modelu byla vytvořena statická charakteristika a z grafu jejího průběhu (viz. obr. 5.16) se dá usoudit, že ani tento model není lineární.

Konečné vyhodnocení tedy zní, že teplovzdušný model je nelineární systém se setrvačností 2. řádu.

Pro všechny experimenty a všechny metody aproximace byly vytvořeny v programu MatLab skripty, které jsou z velké části univerzální, a dají se tak použít prakticky na všechny typy modelů v rámci proporcionálních systémů.

Vzhledem k tomu, že se tato práce zabývá experimentální identifikací proporcionálních systémů se setrvačností 1. a 2. řádu s dopravním zpožděním, bylo by vhodné se v další fázi zaměřit se na identifikaci integračních či derivačních systémů.

Poděkování

Touto formou bych chtěl srdečně poděkovat paní doc. Ing. Renatě Wagnerové, Ph.D., za morální i odbornou podporu a poskytnutí potřebných materiálů při vypracovávání této bakalářské práce.

7 Literatura

BALÁTĚ, J. *Vybrané statě z automatického řízení*. Brno: FS VUT, 1991. 359 s.

BOLTON, W. *Instrumentation and Control Systems*. Oxford: Newnes, c2004, xi, 339 s. ISBN 0-7506-6432-0.

ISERMANN, R., MÜNCHHOF, M. *Identification of Dynamic Systems: An Introduction with Applications*. Berlin: Springer, c2011, xxv, 705 s. ISBN 978-3-540-78878-2.

Matematické metody používané v oblasti automatizace a řízení. books.fs.vsb.cz [online]. 2002. <http://books.fs.vsb.cz/MatMet/ATR.htm>.

Metody identifikace systémů z přechodových charakteristik. 352vsb.cz [online]. 2002 [cit. 2016-2-2]. http://www.352.vsb.cz/uc_texty/Identifikace/str/metody.htm.

NOSKIEVIČ, P. *Modelování a identifikace systémů*. Ostrava: Montanex, 1999, 276 s. ISBN 80-7225-030-2.

SLOVÁK, T. *Využití simulačního programu SIPRO pro identifikaci a prezentaci výsledků v prostředí Internetu*. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 2002. 96 stran. Bakalářská práce, vedoucí: Wagnerová, R.

SMITH, Scott T. *MATLAB: advanced GUI development*. Indianapolis: Dog Ear Publishing, c2006. ISBN 1-59858-181-3.

ŠATÁNEK, J. *Identifikace technologických procesů s podporou programového systému MATLAB*. (Diplomová práce). Ostrava: FS VŠB-TUO, 1995. 51 s.

ŠVARC, I. 1992. *Teorie automatického řízení I*. Brno: FS VUT, 1992. 210 s.

VÍTEČKOVÁ, M., VÍTEČEK, A. *Základy automatické regulace*. Ostrava: VŠB-TUO, 2014. 244 s. ISBN 978-80-248-1924-2.